

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO

Raíssa Lorrana Xavier Amorim

**ESTUDO DE CASO COMPARATIVO ENTRE VIGAS MISTAS
COMPOSTAS POR PERFIS LAMINADOS E FORMADOS A FRIO**

Belo Horizonte

2019

Raíssa Lorrana Xavier Amorim

**Estudo de Caso Comparativo entre Vigas Mistas Compostas por Perfis
Laminados e Formados a Frio**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Estruturas.

Prof. Orientador: Dr. Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
*Curso de Especialização em Análise e Dimensionamento de
Estruturas de Concreto Armado e Aço*

ATA DA DEFESA

“Estudo Comparativo entre Vigas Mistas Compostas por Perfis Laminados e Formados a Frio para Avaliação do Desempenho Estrutural e Custo-Benefício”

RAISSA LORRANA XAVIER AMORIM

Trabalho Final defendido perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço”

Aprovada em 23 de abril de 2019

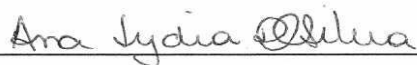
Por:

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas
Avaliador 1 – Orientador



Nota: 80 pontos

Profa. Dra. Ana Lydia Reis de Castro e Silva
Avaliador 2



Nota: 80 pontos

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e Nossa Senhora, pela força e sabedoria concedidas para que esta vitória fosse alcançada.

Agradeço imensamente ao meu professor orientador Rodrigo Barreto Caldas pela amizade, orientação e paciência dispendidas durante todo o processo de elaboração do trabalho.

Aos meus pais, Mariano e Andrea, pelo apoio e amor incondicional em todas as horas.

Aos meus irmãos, Maicon e Thiago, pelo suporte e por sempre acreditarem no meu potencial.

Aos meus amigos, colegas de profissão, pelas horas de descontração, pela troca de experiências e encorajamento.

Aos demais que foram parte deste processo importante da minha vida, meu muito obrigada.

Resumo

Os elementos mistos de aço e concreto são elementos constituídos por um perfil de aço, que pode ser laminado, soldado ou formado à frio, o qual trabalha juntamente com o concreto compondo assim um elemento estrutural. Embora esse tipo de sistema seja amplamente utilizado em outros países, o Brasil ainda se encontra em uma crescente quando se refere ao emprego de estruturas mistas. Este trabalho apresenta um estudo comparativo a fim de se estabelecer a melhor solução de viga mista com perfis laminados, soldados e formados à frio para vãos variando de 3,00 a 12,00 metros. Para isso foi utilizado planilhas de cálculo do Excel, que incluíam todos os parâmetros necessários para o cálculo de vigas mistas. Para o modelo em estudo, os resultados obtidos apontam que para vãos pequenos, até 5,00 metros, o perfil mais econômico e que apresentam o melhor desempenho estrutural foi o perfil formado a frio. Para vãos iguais ou superiores a 6,00 metros, o perfil laminado se torna mais competitivo e apresenta o melhor custo-benefício aliado ao desempenho estrutural.

Palavras-chave: estruturas mistas; vigas mistas aço-concreto; perfis laminados; perfis soldados; perfis formados a frio; comportamento estrutural; custo-benefício.

Abstract

The mixed elements of steel and concrete are elements constituted by a steel profile, which can be laminated, welded or cold-formed, which together with the concrete composes a structural element. Although this type of system is widely used in other countries, Brazil is still growing when it comes to the use of mixed structures. This work presents a comparative study in order to establish the best mixed beam solution with laminated profiles, welded and cold-formed for lengths varying from 3.00 to 12.00 meters. Excel spreadsheets were used, for this purpose, which included all the necessary parameters for the calculation of composite beams. For the model under study, the results obtained indicate that for small lengths, up to 6.00 meters, the most economical profile and that also present the best structural performance was the cold-formed profile. For lengths equal to or greater than 6.00 meters, the laminated profile becomes more competitive and presents the best cost-benefit combined with structural performance.

Keywords: mixed structures; mixed steel-concrete beams; laminated profiles; welded profiles; cold-formed profiles; structural behaviour; cost benefit.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVO	9
2.1	Justificativa	9
3	REVISÃO DA LITERATURA	100
3.1	Estruturas Mistas	100
3.2	Vigas Mistas	100
3.3	Conectores de Cisalhamento	133
3.3.1	Conector pino com cabeça (<i>stud bolt</i>)	144
3.3.2	Conector perfil U laminado ou formado a frio	155
3.4	Perfis Laminados	155
3.5	Perfis Soldados	166
3.6	Perfis Formados a Frio	18
4	ESTUDO DE CASO	200
4.1	Metodologia	200
4.2	Descrição da Estrutura	200
4.3	Propriedades Geométricas e Mecânicas dos Materiais	21
4.3.1	Propriedades Geométricas	211
4.3.2	Propriedades Mecânicas	244
4.4	Pré-dimensionamento	255
4.5	Levantamento das Ações	255
4.5.1	Ações Permanentes	255

4.5.2	Ações Variáveis	266
4.6	Combinações Últimas Normais	266
4.7	Combinações Quase Permanentes de Serviço	28
4.8	Modelo de Cálculo da Estrutura	300
4.9	Análises e Resultados	300
5	CONCLUSÃO	333
6	REFERÊNCIAS	344

1 INTRODUÇÃO

O emprego de estruturas mistas no Brasil vem crescendo consideravelmente nas últimas décadas, em razão das vantagens do sistema em relação a estruturas somente de aço ou concreto, onde, pode-se destacar, tempo reduzido em execução de obra, bom comportamento estrutural, redução do peso próprio da estrutura, eliminação ou redução de formas e escoramentos, entre outros.

As vigas mistas, objeto de estudo do trabalho, são compostas por um perfil de aço, este, que pode ser laminado, soldado ou formado a frio, envoltas totalmente ou parcialmente por concreto. A interação desse sistema misto é realizada através de ligações mecânicas, que garantem o comportamento conjunto dos materiais para resistir aos carregamentos solicitantes.

O dimensionamento das vigas mistas depende de diversos fatores, dentre eles, o grau de interação do aço-concreto, que pode ser completo ou parcial, a largura efetiva, que é a faixa da laje que trabalha em conjunto com o perfil de aço e a necessidade ou não do uso de escoramentos. O sistema misto aço-concreto, quando se trata de vãos médios a elevados, é mais competitivo, devido a diminuição considerável do peso da estrutura, o que resulta em uma obra mais econômica.

2 OBJETIVO

Este projeto tem como objetivo avaliar por meio de um estudo de caso comparativo, a melhor solução de viga mista, com perfis laminados, soldados e formados a frio, para vãos variando de 3,00 a 12,00 metros. Verificar o custo-benefício de cada solução.

2.1 Justificativa

A interação aço-concreto é indispensável para que o elemento possa ser classificado como um elemento misto. Os elementos mistos são constituídos pela associação de perfis de aço com elementos de concreto, afim de se aproveitar as vantagens de cada material.

Em outros países e atualmente no Brasil, o sistema estrutural misto vem sendo amplamente utilizado na construção civil, devido as vantagens que sistema misto proporciona, quando comparado a outros sistemas construtivos.

A associação aço-concreto resulta em estruturas mais leves, onde o consumo de aço e concreto são menores, em razão da redução das dimensões dos elementos metálicos e o menor volume de concreto utilizado em obra.

As vigas mistas, são elementos compostos por um perfil de aço, envoltas ou não por concreto, associadas a laje por meio de conectores de cisalhamento. Esse comportamento solidário entre o perfil de aço e a laje de concreto resulta no acréscimo de resistência e rigidez desse elemento estrutural. Visto isso, o trabalho justifica-se pelo fato de se analisar por meio de um estudo comparativo, qual perfil é mais recomendado, quando se analisa desempenho estrutural e custo-benefício para cada dimensão de vão, e assim, quando se for calcular as estruturas, poder fazer um pré-dimensionamento mais assertivo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Estruturas Mistas

Queiroz et al. (2001) “denomina sistema misto aço-concreto como aquele no qual um perfil de aço (laminado, soldado ou formado a frio) trabalha em conjunto com o concreto (geralmente armado), formado um pilar misto, uma viga mista, uma laje mista ou uma ligação mista”.

Desde o século passado, as estruturas mistas vêm sendo utilizadas em construções no mundo todo. O seu emprego no Brasil vem crescendo consideravelmente nas últimas décadas, devido as vantagens econômicas e construtivas em relação a estruturas somente de aço ou concreto.

O concreto, comparativamente com o aço, apresenta vantagens de compor seções mais rígidas e de ser mais resistente ao fogo e à corrosão. Por outro lado, o aço é um material com grande resistência à tração, oferece vantagens na montagem, possibilita economias nas fundações devido ao peso próprio relativamente baixo da estrutura, além de oferecer um canteiro de obras mais limpo, mas apresenta problemas de instabilidade para elementos esbeltos. Nos elementos estruturais mistos de aço e concreto, procura-se aproveitar ao máximo as vantagens que cada um dos dois materiais pode proporcionar. Nessa situação ambos os materiais apresentam seu melhor desempenho. (FIGUEIREDO, 1998, p. 3)

Geralmente a aderência entre aço e o concreto não é suficiente para suportar todos esforços solicitantes a que são submetidos. Visto isso, é necessário introduzir dispositivos que efetuem uma ligação mecânica, afim de promover a aderência necessária e fazer com que os elementos resistam solidariamente aos esforços. Esses dispositivos são chamados de conectores de cisalhamento e podem ser do tipo pino com cabeça (*stud bolt*) e perfil U laminado ou formado a frio.

3.2 Vigas Mistas

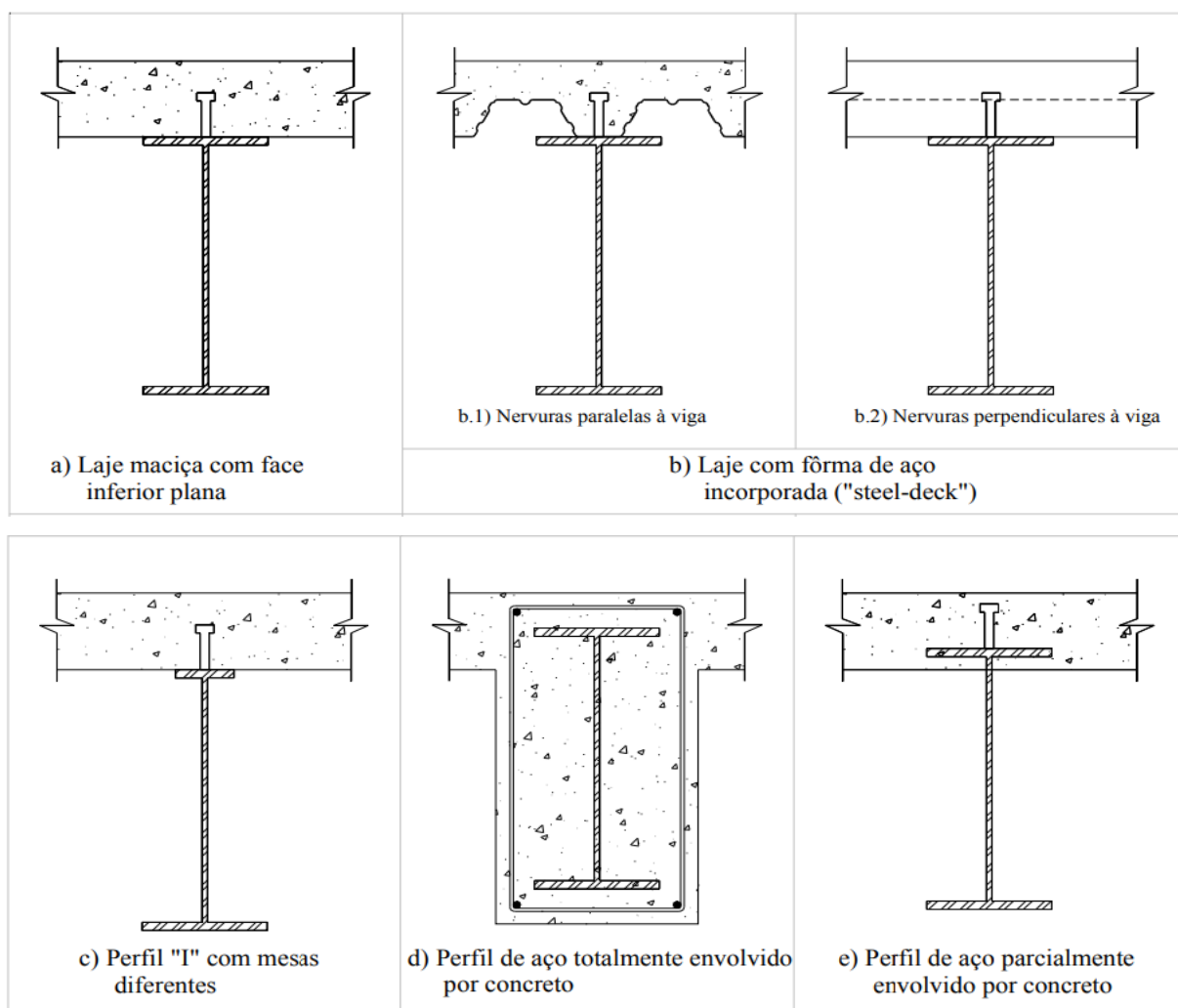
A ABNT NBR 8800:2008 define que:

as vigas mistas de aço e concreto consistem de um componente de aço simétrico em relação ao plano de flexão, que pode ser um perfil I, um perfil caixão, um perfil tubular retangular ou uma treliça, com uma laje de concreto moldada no local acima de sua face superior, havendo ligação mecânica por meio de conectores de cisalhamento entre o componente de aço e a laje de tal forma que ambos funcionem como um conjunto para resistir à flexão. (ABNT NBR 8800:2008, p.183).

As vigas mistas são estruturas compostas por um perfil de aço ligado mecanicamente por meio de conectores de cisalhamento, a uma laje que pode ser de concreto armado convencional ou uma laje mista com fôrma de aço incorporada, de maneira que esses elementos trabalhem em conjunto.

A Figura 1 ilustra algumas seções transversais de vigas mistas.

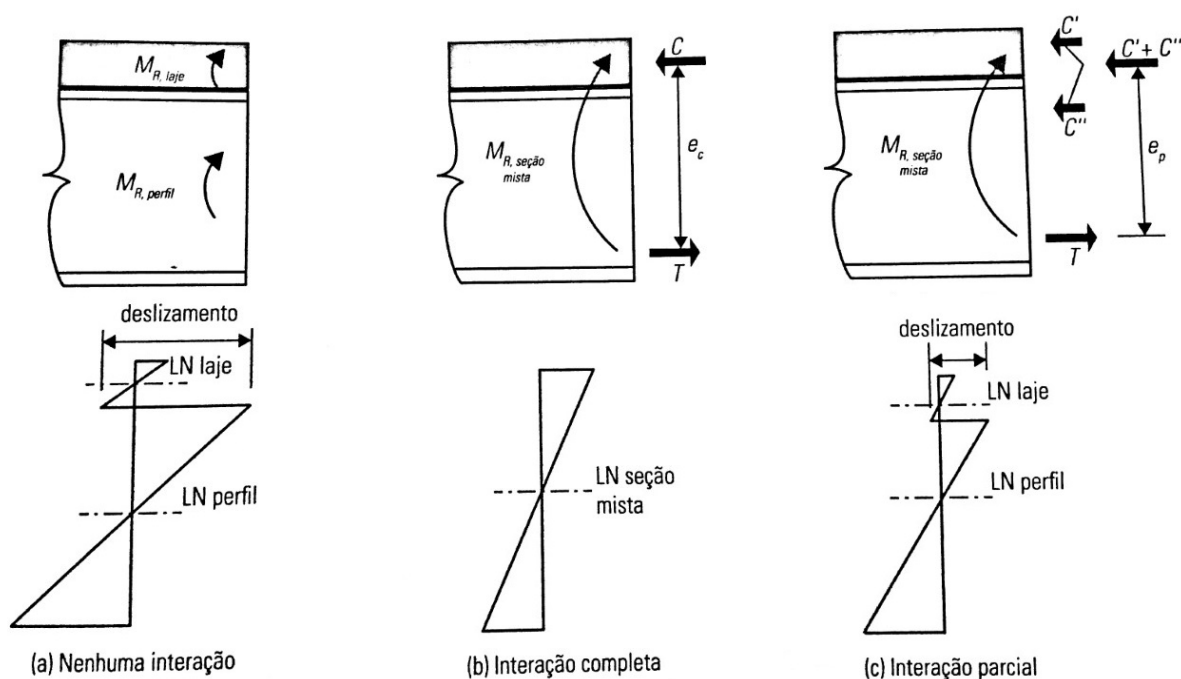
Figura 1 – Seções Transversais de Vigas Mistas



Fonte: Fabrizzi (2007)

Para o dimensionamento de vigas mistas, deve-se considerar um fator muito importante, que é o grau de interação entre o aço e o concreto. Esse grau de interação pode dar de forma completa ou parcial, o que leva em conta, entre outros fatores, o número de conectores em cada lado da seção de momento fletor solicitante máximo. Na interação completa, considera-se que o deslocamento relativo substancial entre o perfil de aço e o concreto é nulo ou quase nulo. Esse caso, apresenta somente uma linha neutra e considera-se seção mista. Na interação parcial pressupõem-se que há um deslocamento relativo entre os materiais, e nesse caso, a seção apresenta duas linhas neutras, uma passando na laje de concreto armado convencional ou uma laje mista com fôrma de aço incorporada, outra passando no perfil de aço (Figura 2) (OLIVEIRA, 2018).

Figura 2 – Deformações conforme o Grau de Interação Aço-Concreto



Fonte: Fakury et al. (2016)

Conforme Fakury et al. (2016), os estados-limites últimos aplicáveis à viga mista em virtude do momento fletor, são a flambagem local da alma (FLA) e o colapso por plastificação total da seção transversal (formação de rótula plástica). Nas vigas mistas não ocorre a flambagem lateral

com torção (FLT), em razão da mesa superior estar continuamente ligada a laje por meio dos conectores de cisalhamento e a flambagem local da mesa (FLM) não caracteriza um estado-limite último, mesmo que a mesa superior esteja comprimida, pois o elemento que resiste às tensões de compressão é a laje de concreto. Os estados-limites de serviço associados às vigas mistas caracterizam-se pela vibração demasiada do piso, deslocamentos excessivos e a fissuração da laje por tendência de continuidade.

Ao optar por vigas mistas, deve-se estabelecer se o elemento será ou não escorado durante a sua fase de execução. Se a condição para se resistir as cargas de peso próprio e de construção for o desempenho conjunto dos materiais aço-concreto, a viga mista deve ser escorada, afim de aguardar que o concreto atinja 75% de sua resistência característica a compressão. Caso contrário, o perfil de aço deve dispor de resistência suficiente para suportar todas as ações atuantes antes da cura do concreto. (QUEIROZ et al. 2001)

3.3 Conectores de Cisalhamento

Os conectores de cisalhamento são os elementos que realizam a ligação entre o perfil de aço e o concreto, caracterizando assim o comportamento misto. Eles têm como função absorver os esforços longitudinais de cisalhamento, provenientes do deslizamento relativo entre o perfil de aço e laje de concreto e impedir que haja o deslocamento vertical na interface dos dois materiais.

Antes da concretagem, os conectores de cisalhamento são instalados diretamente no perfil de aço, quando laje maciça, ou sobre a fôrma de laje mista, em geral, por meio de solda, afim de garantir que os materiais trabalhem em conjunto.

Os conectores de cisalhamento podem ser classificados como flexíveis ou rígidos. Para Alva (2000, p. 16), “o conceito de rigidez, neste caso, está relacionado com a capacidade de restrição ao escorregamento imposta pela ligação viga de aço/laje de concreto. Os conectores do tipo pino com cabeça são os mais utilizados dentre os flexíveis, na maioria dos países”.

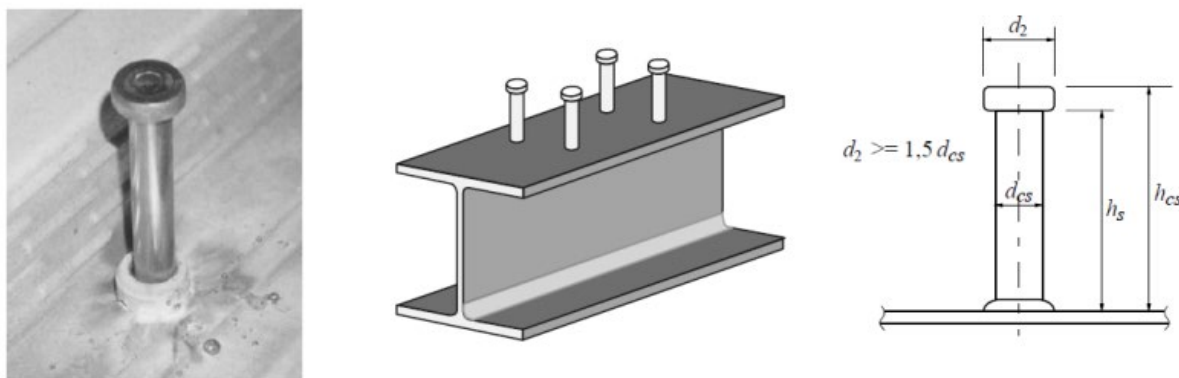
Ainda, de acordo com Alva (2000, p. 16), “a característica estrutural mais importante dos conectores de cisalhamento é a relação existente entre a força F transmitida pelo conector e o escorregamento relativo s na interface aço-concreto, determinando seu comportamento dúctil”.

3.3.1 Conector pino com cabeça (*stud bolt*)

Desenvolvido na década de 40 por Nelson Stud Welding, o conector pino com cabeça consagrou-se mundialmente e vem sendo o mais utilizado nos dias atuais, devido a produtividade e desempenho construtivo que se observa na facilidade e rapidez que se é feita aplicação do conector em obra, e o fato de se poder eliminar o uso de escoras e fôrmas de madeira, quando laje mista, pois, se aplica o conector diretamente sobre a fôrma de aço. (VERÍSSIMO, 2007).

Os conectores pino com cabeça (*stud bolt*) são fabricados com o diâmetro nominal de 19 mm e 22 mm, dado que, para lajes mistas não se é permitido utilizar um conector de cisalhamento com o diâmetro superior a 19 mm, este assim, é o mais usualmente empregado para edificações (Figura 3). O aço estrutural utilizado nesse tipo de conector é o ASTM A108 – Grau 1020, com resistência de escoamento igual a 345 MPa e resistência à ruptura igual a 415 MPa. (FAKURY ET AL., 2016).

Figura 3 – Conector tipo pino com cabeça

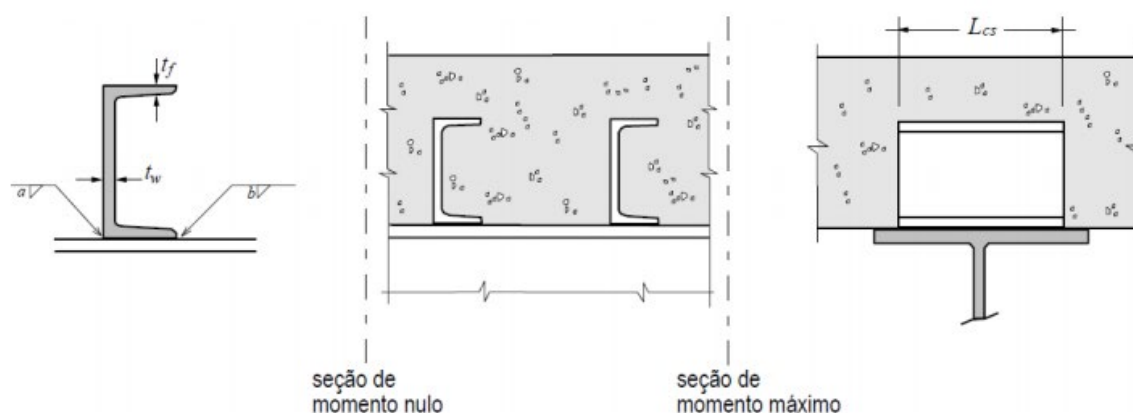


Fonte: Veríssimo (2007)

3.3.2 Conector perfil U laminado ou formado a frio

“Utilizado no Brasil, em desuso nos países industrializados, o conector em perfil U laminado, consiste basicamente de um pedaço de perfil U laminado cortado, com uma das mesas soldada ao perfil de aço e com o plano da alma perpendicular ao eixo longitudinal do perfil (Figura 4)”. (FIGUEIREDO, 1998)

Figura 4 – Conector tipo Perfil U



Fonte: Veríssimo (2007)

Veríssimo (2007), afirma que, o desuso é consequência de algumas restrições quanto a utilização do perfil U laminado ou soldado, como por exemplo, a baixa produtividade na instalação, a limitação da aplicação, em geral, somente em lajes maciças, em virtude de o espaço ser insuficiente na mesa da viga para sua colocação em sistema de pré-lajes e sua incompatibilidade com a fôrma metálica.

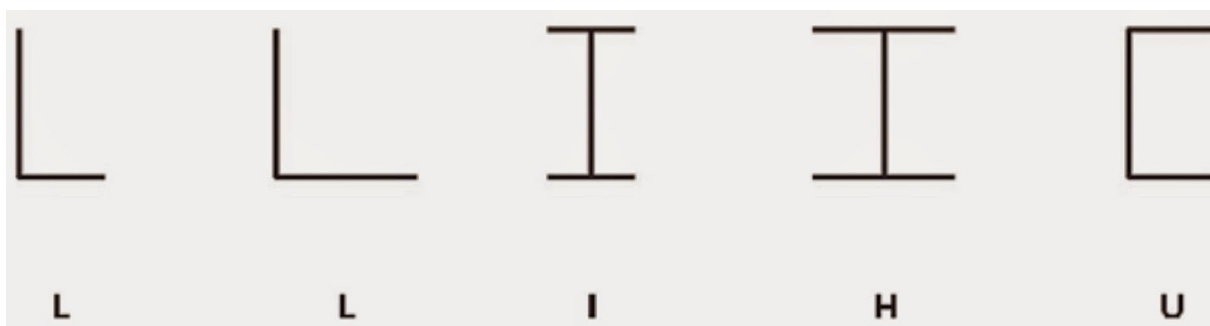
3.4 Perfis Laminados

Os perfis laminados são produzidos por meio de um processo chamado laminação a quente, que consiste em um sistema de transformação mecânica de metais, afim de torná-los adequado ao uso. Esses perfis podem ser aplicados em diferentes áreas, como por exemplo, na construção civil, naval, em fundações, e em indústrias. As limitações dos perfis laminados quanto a

fabricação, acontecem, devido ao processo de laminação, que impõem restrição de bitolas em relação às alturas. (SCHMITZHAUS, 2015, (a))

O perfil laminado utilizado nesse trabalho é o perfil I, porém eles podem ser fabricados em diversas formas ou seções, como pode-se observar na figura 5.

Figura 5 – Tipos de Perfis Laminados



Fonte: Schimitzhaus (2015)

De acordo com Silva e Fruchtengarten (2012):

os perfis laminados são aqueles fabricados a quente nas usinas siderúrgicas e são os mais econômicos para utilização em edificações de estruturas metálicas, pois dispensam a fabricação “artesanal” dos perfis soldados ou dos perfis formados a frio. A Siderúrgica Aço Minas Gerais – AÇOMINAS, hoje integrante do grupo Gerdau, foi projetada para suprir o mercado com perfis laminados adequados ao uso na construção civil. Por se tratar de um perfil fabricado diretamente na siderúrgica, há dimensões padronizadas e o projetista fica restrito a essas dimensões. Se houver necessidade de perfis de dimensões diferentes das padronizadas, podem ser utilizados os perfis formados a frio ou soldados em substituição ao laminado. Os perfis laminados fabricados no Brasil dividem-se em duas séries: W e HP. A designação dos perfis é: a série seguida da altura e da massa por unidade de comprimento. Por exemplo: W 310 x 44,5 ou HP 250 x 62. O aço geralmente utilizado na fabricação desses perfis é o ASTM A 572 Gr 50, com $f_y = 345 \text{ MPa}$ e $f_u = 450 \text{ MPa}$.

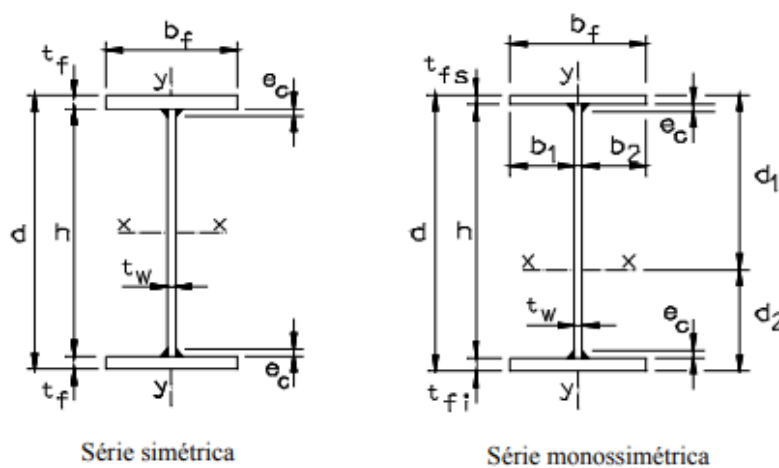
3.5 Perfis Soldados

Os perfis soldados são chapas de aço estrutural ou perfis laminados unidos entre si por meio de solda elétrica. Eles amplamente utilizados, principalmente, quando os perfis laminados não atendem as necessidades em decorrência da pouca variedade de seções transversais, que diferentemente dos perfis soldados, admitem diversas combinações de larguras, alturas e

espessuras, auxiliando na redução do peso quando comparados aos perfis laminados disponíveis. (SILVA E FRUCHTENGASRTEN, 2012)

De acordo com Schmitzhaus (2015, (b)), os perfis soldados são padronizados pela ABNT NBR 5884:2013 – Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico, que fixa os requisitos exigíveis para fabricação dos perfis estruturais de aço soldados por arco elétrico, formando um I em sua seção transversal. Os perfis soldados são fabricados em configuração I, e possuem as designações VS para vigas, CS para colunas e CVS para quando há uma ação de viga e coluna. (Figura 6)

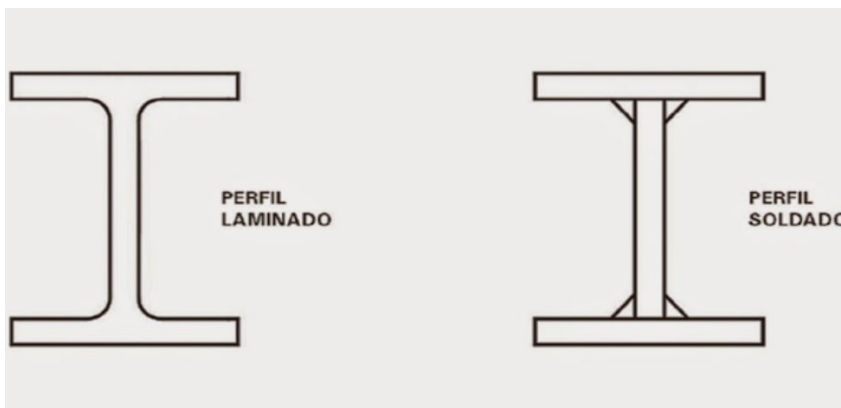
Figura 6 – Perfis Soldados



Fonte: Silva e Fruchtengarten (2012)

Na figura 7 pode-se comparar a seção transversal de um perfil laminado e um perfil soldado.

Figura 7 – Perfis Laminado *versus* Perfil Soldado



Fonte: Schimitzhaus (2015)

3.6 Perfis Formados a Frio

Segundo Soares (2002), o emprego dos perfis de aço formados a frio no Brasil vem crescendo continuamente em virtude da aplicação em edifícios residenciais e galpões como elementos com função estrutural ou não, os quais devem ser dimensionados para situação de incêndio.

Silva e Fruchtengasrten (2012) citam que,

nem sempre são encontrados no mercado os perfis laminados com dimensões adequadas às necessidades do projeto de elementos estruturais leves, pouco solicitados, tais como terças, montantes e diagonais de treliças, travamentos, etc., enquanto os perfis estruturais formados a frio podem ser fabricados nas dimensões desejadas. Os perfis estruturais formados a frio, também conhecidos como perfis de chapas dobradas, vêm sendo utilizados de forma crescente na execução de estruturas metálicas leves, pois podem ser projetados para cada aplicação específica. Os perfis formados a frio, sendo compostos por chapas finas, possuem leveza, facilidade de fabricação, de manuseio e de transporte, além de possuírem resistência e ductilidade adequadas ao uso em estruturas civis. No caso de estruturas de maior porte, a utilização de perfis formados a frio duplos, em seção unicelular (tubular-retangular) também conhecidos como seção-caixão, pode resultar, em algumas situações, em estruturas mais econômicas. Isso se deve à boa rigidez à torção (eliminando travamentos), menor área exposta, (reduzindo a área de pintura), menor área de estagnação de líquidos ou detritos (reduzindo a probabilidade de corrosão). Perfis formados a frio são perfis conformados a partir do dobramento a frio de chapas.

Os perfis formados a frio, dentre outras vantagens, apresentam um menor custo de montagem e fabricação, além de serem mais leves que os perfis laminados e soldados, também apresentam

uma maior variedade quanto a seção transversal. Todas essas e outras vantagens promovem cada vez mais a sua utilização na construção civil. (SOARES, 2002)

Os processos de fabricação podem ser por conformação contínua ou por dobramento (processo não contínuo), como ilustram as figuras 8 e 9.

Figura 8 – Perfil Formado a Frio pelo processo de Conformação contínua



Fonte: Silva e Fruchtengarten (2012)

Figura 9 – Perfil Formado a Frio pelo processo de Dobramento



Fonte: Silva e Fruchtengarten (2012)

4 ESTUDO DE CASO

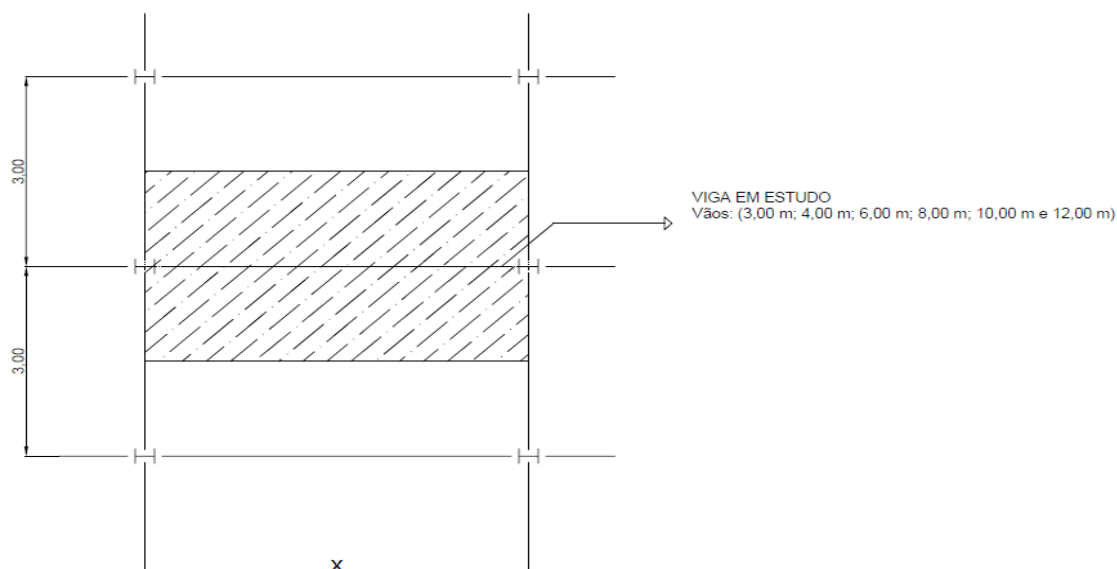
4.1 Metodologia

Para que o objetivo geral do trabalho fosse alcançado, a metodologia estabelecida consistiu em realizar um estudo comparativo por meio de planilhas de cálculo do Excel que incluíam todos os parâmetros necessários para o cálculo de vigas mistas. Foi estabelecido uma estrutura de lajes maciças com espessura de 10 cm, simplesmente apoiadas em vigas mistas, com os vãos variando de 3,00 a 12,00 metros, e consecutivamente, variando os tipos de perfis (laminado, soldado ou formado a frio) para cada vão, afim de se avaliar qual o perfil que apresenta a melhor solução para cada vão, levando em conta o comportamento estrutural e o custo-benefício.

4.2 Descrição da Estrutura

A laje em estudo é uma laje maciça de concreto com espessura igual a 10 cm, biapoiada nas duas direções com vãos variando de 3,00 a 12,00 metros, podendo ser as vigas em perfis laminados, soldados ou formados a frio, como pode ser observado na Figura 10 abaixo.

Figura 10 – Laje e Viga em estudo



Fonte: Autoria própria (2019)

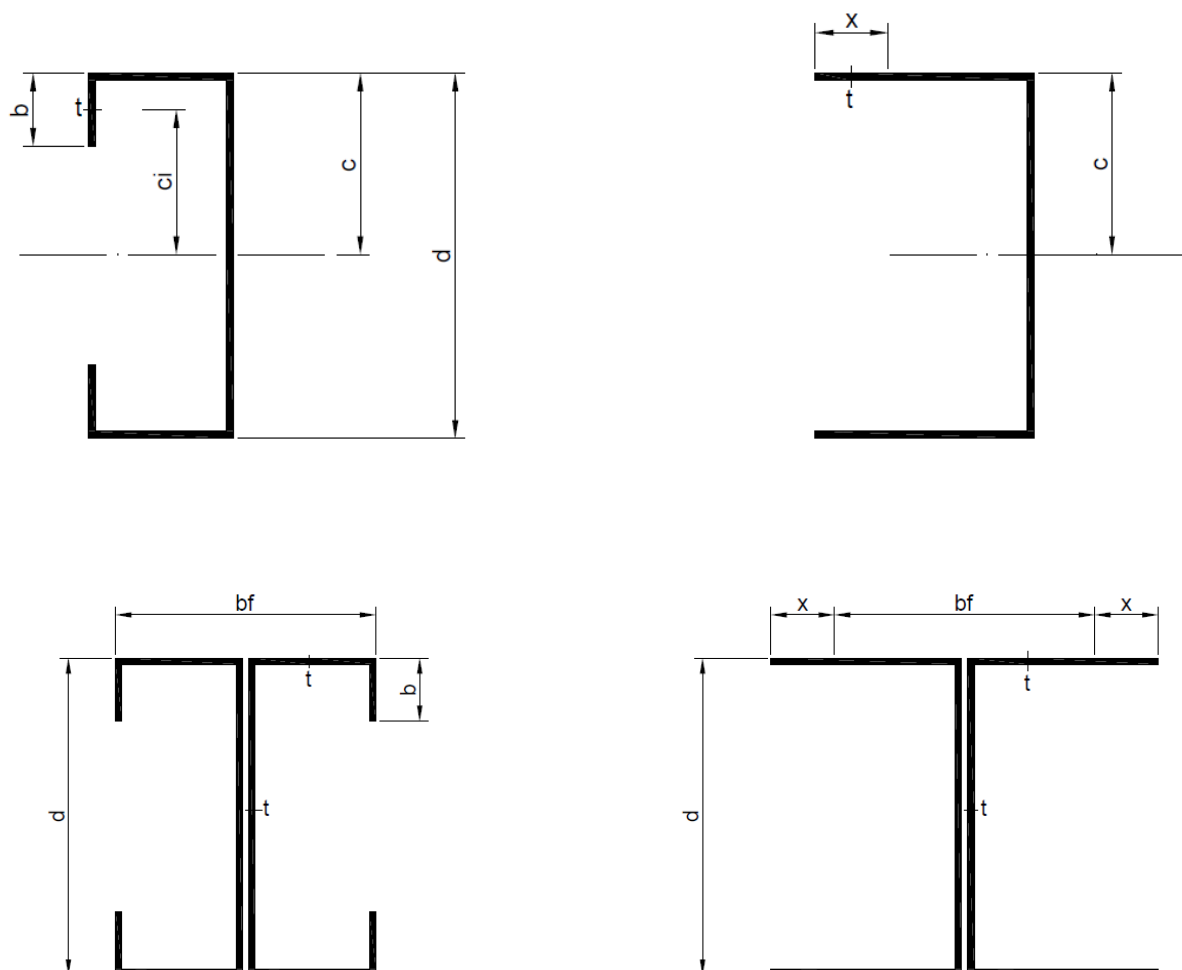
4.3 Propriedades Geométricas e Mecânicas dos Materiais

4.3.1 Propriedades Geométricas

Para a viga em estudo foi adotado o perfil I tanto para laminados, soldados como perfis formados a frio. Porém os perfis formados a frio não possuem em seu catálogo o perfil I, sendo assim, para se obter o perfil semelhante ao um perfil I, usa-se na prática a junção de dois perfis Ue (U enrijecido).

Os perfis Ue, como o próprio nome já diz, possuem enrijecedores em cada canto das mesas. Assim, para que se obter o comportamento mais parecido possível dos perfis I, foi-se necessário fazer uma compatibilização dos perfis Ue, onde cada enrijecedor foi aberto formando um perfil I. Diante disso foi realizado um cálculo para se avaliar o quanto daquele enrijecedor seria considerado para o aumento do Módulo resistente plástico Z , como pode-se observar na figura subsequente. A fórmula desenvolvida segue abaixo. (Figura 11)

Figura 11 – Compatibilização do Perfil Ue



Fonte: Autoria própria (2019)

Onde,

- (b) corresponde ao enrijecedor, cujo comprimento gira em torno de 12,5% a 15% da alma do perfil Ue;
- (x) corresponde à valor em comprimento que será adicionado às mesas, afim de compatibilizar o perfil antes Ue para o perfil I;
- (t) corresponde a espessura das mesas, alma e enrijecedores;

- (d) corresponde à altura total do perfil;
- (bf) corresponde a largura das mesas;
- (c) corresponde a distância da metade do comprimento da alma;
- (ci) corresponde a distância entre a metade do comprimento da alma até a metade do comprimento do enrijecedor.

Considerando o enrijecedor igual a 12,5% a 15% o comprimento da alma do perfil, temos:

$$b = (0,125 \text{ a } 0,150) \times 2c \quad (1.0)$$

Logo:

$$b = (0,25 \text{ a } 0,30) \times c \quad (1.1)$$

O módulo plástico da seção:

$$z = (b \times t) \times ci = (x \times t) \times c \quad (1.2)$$

Isolando a variável c , têm-se:

$$c = \frac{b}{0,25 \text{ a } 0,30} \quad (1.3)$$

Considera-se ci igual a distância entre a metade do comprimento da alma até a metade do comprimento do enrijecedor:

$$ci = c - (0,5 \times b) \quad (1.4)$$

Substituindo o valor de ci na equação (1.2), têm-se:

$$b \times t \times (c - 0,5 \times b) = x \times t \times c \quad (1.5)$$

Igualando os dois termos da equação resultante, de modo a obter o valor de x , chega-se a:

$$x = b - \frac{0,5 \times b^2}{c} \quad (1.6)$$

Adotando c igual a:

$$c = \frac{b}{0,25} \quad (1.7)$$

Substituindo a equação (1.7) na equação (1.6):

$$x = b - \frac{0,5 \times b^2}{\frac{b}{0,25}} \quad (1.8)$$

Logo:

$$x = b - 0,125 \times b \quad (1.9)$$

Considera-se que o comprimento referente ao enrijecedor que será acrescido ao comprimento da mesa é igual a:

$$x = 0,875 \times b \quad (1.10)$$

4.3.2 Propriedades Mecânicas

O aço possui módulo de elasticidade longitudinal (E) igual a 200.000 MPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 em regime elástico, módulo de elasticidade transversal (G) igual a 77.000 MPa e peso específico igual a 77 kN/m³.

Para a viga em perfil laminado foi adotado o aço estrutural previsto pela ABNT NBR 8800:2008 ASTM A572 – Grau 50. Suas propriedades mecânicas principais são a resistência ao escoamento (f_y) igual a 345 MPa e a resistência à ruptura (f_u) igual a 450 MPa.

Para a viga em perfil soldado foi adotado o aço estrutural de especificação própria da USIMINAS, o USI CIVIL 350, com resistência ao escoamento (f_y) igual a 350 MPa e a resistência à ruptura (f_u) igual a 500 MPa.

Para a viga em perfil formado a frio foi adotado o aço USI SAC 300 da USIMINAS, com resistência ao escoamento (f_y) igual a 300 MPa e a resistência à ruptura (f_u) igual a 510 MPa.

Adotou-se um concreto com resistência característica à compressão (f_{ck}) igual a 30 MPa, módulo de elasticidade secante igual a 27.000 MPa e peso específico igual a 25 kN/m³ (concreto armado). Todas as propriedades mecânicas citadas estão previstas na ABNT NBR 6118:2014.

4.4 Pré-dimensionamento

Para o lançamento dos parâmetros na tabela foi realizado um pré-dimensionamento das cargas e esforços solicitantes de acordo com cada tipo de viga metálica.

4.5 Levantamento das Ações

O levantamento das ações para o lançamento dos parâmetros na tabela do Excel foi feito com base nas normas ABNT NBR 8800:2008, ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 6120:2017.

4.5.1 Ações Permanentes

Considerou-se ações permanentes o peso próprio das vigas de aço, o revestimento do piso e laje em concreto armado com espessura de 10 cm. A largura de influência da laje foi definida igual a 3,00 m. (Tabela 1)

Tabela 1 – Ações Permanentes

ELEMENTO	CARGA	
Peso próprio das vigas de aço	0,25 kN/m ²	$0,25 \times 3,00 = 0,75 \text{ kN/m}$
Laje de concreto e = 10 cm	0,50 kN/m ²	$25 \times 0,10 \times 3,00 = 7,50 \text{ kN/m}$
Revestimento do piso	25 kN/m ³	$0,50 \times 3,00 = 1,50 \text{ kN/m}$

Fonte: Autoria Própria (2019)

4.5.2 Ações Variáveis

De acordo com a ABNT NBR 6120:2017 a sobrecarga de utilização considerada no projeto foi de 3,00 kN/m². Para este projeto não foi considerada sobrecarga de construção.

4.6 Combinações Últimas Normais

Para simplificação das combinações de ações, as ações permanentes diretas podem ser agrupadas e ponderadas por um único coeficiente, assim como as ações variáveis, chamando assim de ações agrupadas. Os coeficientes unificados são atribuídos de acordo com a intensidade de todas as ações variáveis características que atuam no piso ou na cobertura em consideração, assim como do tipo de combinação (normal ou de construção), ilustrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes de Ponderação Unificados das Ações Permanentes diretas e Variáveis

Intensidade de todas as ações variáveis características atuando no piso ou na cobertura em consideração	Combinação	Ações que aumentam o valor do efeito procurado	
		Permanentes direta (Yg)	Variáveis (Yq)
$\leq 5,0 \text{ kN/m}^2$	Normal	1,40	1,40
	De construção	1,30	1,20
$> 5,0 \text{ kN/m}^2$	Normal	1,35	1,50
	De construção	1,25	1,30

Fonte: Adaptado de Fakury et al. (2016)

As ações permanentes características após a cura do concreto, e a ação variável característica, que é a sobrecarga de utilização, que solicitam a viga em estudo como cargas uniformemente distribuídas, q_k , são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Cargas e esforços solicitantes característicos

TIPO DE AÇÃO	FASES DE ATUAÇÃO	ESPECIFICAÇÃO	q_k (kN/m)	TOTAL
AÇÕES PERMANENTES (PESOS PRÓPRIOS)	Antes e após a cura do concreto	Perfil de aço, conectores, chapas de ligação, parafusos etc	0,75 kN/m	8,25 kN/m
		Laje de concreto	7,50 kN/m	
	Somente após a construção	Revestimento do piso	1,50 kN/m	1,50 kN/m
AÇÃO VARIÁVEL (SOBRECARGA)	Somente após a construção	Sobrecarga de utilização	9,00 kN/m	9,00 kN/m

Fonte: Autoria própria (2019)

As cargas uniformemente distribuídas na viga e os esforços solicitantes de cálculo máximos, conforme o agrupamento das ações permanentes e variáveis, são:

- Fase de utilização (vida útil), solicitando a viga mista.

$$q_{vm,d} = 1,4 (8,25 + 1,50) + 1,4 (9,00) = 26,25 \text{ kN/m}$$

$$\text{Momento solicitante de cálculo da viga mista: } M_{vm,sd} = \frac{q_{vm,d} \times (Le)^2}{8} ;$$

$$\text{Cortante solicitante de cálculo da viga mista: } V_{vm,sd} = \frac{q_{vm,d} \times Le}{2} .$$

Tabela 4 – Momento e Cortante solicitantes de cálculo da viga mista para cada vão

<i>Vãos</i> <i>L_e</i> <i>m</i>	<i>M_{vm, sd}</i> <i>kN. cm</i>	<i>V_{vm, sd}</i> <i>kN</i>
3,00	2953,00	39,38
4,00	5250,00	52,50
6,00	11813,00	78,75
8,00	21000,00	105,00
10,00	32813,00	131,25
12,00	47250,00	157,50

Fonte: Autoria própria (2019)

4.7 Combinações Quase Permanentes de Serviço

Para verificação dos deslocamentos (flechas) utiliza-se a combinação quase permanente de serviço, para isso, é necessário que o momento solicitante da viga mista seja o momento solicitante característico. Assim, temos:

Tabela 5 – Momento solicitante característica da viga mista

<i>Vãos</i> <i>L_e</i> <i>m</i>	<i>M_{L, sk}</i> <i>kN. cm</i>
3,00	2109,29
4,00	3750,00
6,00	8437,86
8,00	15000,00
10,00	23437,86
12,00	33750,00

Fonte: Autoria própria (2019)

A flecha máxima da viga deve atender à seguinte condição:

$$\delta_{m\acute{a}x} \leq \delta_{adm} = \frac{L_e}{350}$$

A flecha máxima, tendo em vista que há escoramento antes da cura do concreto, é igual a:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \delta_{p,ld} + \delta_{v,cd} + \delta_{v,ld} - \delta_c$$

onde,

- $\delta_{p,ld}$ é a flecha da seção mista causada pelas ações permanentes que atuam após a cura do concreto (ações de longa duração);
- $\delta_{v,cd}$ é a flecha causada pelas ações variáveis de curta duração;
- $\delta_{v,ld}$ é a flecha causada pelas ações variáveis de longa duração;
- δ_c é a contra flecha dada ao perfil de aço (se houver);
- δ_{adm} é a flecha admissível da viga (deslocamento vertical máximo permitido).

O valor das ações variáveis de longa duração a ser usado para a determinação de $\delta_{v,ld}$ corresponde ao valor quase permanente dessas ações, dado pelo produto da totalidade das ações variáveis pelo fator de redução φ_2 , igual a 0,4 para edifícios de escritórios que foi considerado nesse projeto. O valor das ações variáveis de curta duração a ser usado para determinação de $\delta_{v,cd}$, consequentemente, corresponde à totalidade das ações variáveis, menos as ações variáveis de longa duração $(1 - \varphi_2)$, que é igual a $1 - \varphi_2 = 1 - 0,4 = 0,6$. (FAKURY ET AL., 2016).

A tabela de cálculo do Excel considera para o cálculo das flechas, o momento característico correspondente a cada uma das cargas que causam as flechas. (Tabela 4)

Tabela 6 – Momentos correspondentes às flechas

Vãos L_e m	δ_{adm} $L_e/350$ cm	$M_{L,sk}$ kN. cm	$M_{p,ld}$ kN. cm	$q_{v,cd}$ kN/m	$M_{v,cd}$ kN. cm	$q_{v,ld}$ kN/m	$M_{v,ld}$ kN. cm	δ_c cm
3,00	0,86	2109,29	1096,88	0,60 x 9,00 = 5,40	607,50	0,40 x 9,00 = 3,60	405,00	0,00
4,00	1,14	3750,00	1950,00		1080,00		720,00	0,00
6,00	1,71	8437,86	4387,50		2430,00		1620,00	0,00
8,00	2,29	15000,00	7800,00		4320,00		2880,00	0,00
10,00	2,86	23437,86	12187,50		6750,00		4500,00	0,00
12,00	3,43	33750,00	17550,00		9720,00		6480,00	0,00

Fonte: Autoria própria (2019)

4.8 Modelo de Cálculo da Estrutura

O modelo de cálculo da estrutura foi realizado no programa computacional Microsoft Office Excel, desenvolvido pela Microsoft, que é um editor de planilhas com recursos que incluem uma interface intuitiva com eficientes ferramentas de cálculo e concepção de tabelas.

Foram utilizadas tabelas de cálculo no Excel apresentadas nos Apêndices e Anexos com os parâmetros utilizados para o cálculo de vigas mistas de aço e concreto. Na lista de perfis foram incluídos perfis laminados, soldados e formados a frio, afim de que se pudesse retirar a conclusão de quais perfis tem o melhor custo benefício de acordo com a variação dos vãos.

4.9 Análises e Resultados

Para a análise dos dados, foi necessário alimentar a tabela com parâmetros previamente estabelecidos, devido as condições propostas pelo engenheiro de estruturas, como por exemplo, tipo de brita, f_{ck} , tipo do conector, diâmetro do conector, tipo de laje, entre outros.

Para esse projeto, foi-se estabelecido os seguintes parâmetros:

- f_{ck} : 30 kN/cm²;
- Brita: granito ou gnaise;
- Laje maciça;
- Altura da fôrma metálica (hf): 0 cm;
- Altura do concreto: 10 cm;

- Conector do tipo pino com cabeça;
- Rg: 1,00;
- Rp: 1,00;
- Bordas com vigas adjacentes.

Pôde-se concluir então, que para vãos pequenos, o perfil formado a frio foi a melhor solução, uma vez que foi o perfil mais leve, e devido a pequena variedade de espessuras, caracterizados por serem perfis mais esbeltos limitam-se a vãos menores. Já para vãos médios a elevados, o perfil laminado foi a melhor solução, devido a gama de alturas e espessuras maiores que se encontra no mercado, conseguindo conciliar um perfil leve e eficaz para resistir aos carregamentos, além de ser um perfil com o custo de fabricação menor do que os soldados. (Tabela 5). Priorizou-se adotar perfis que fosse utilizado a máxima capacidade resistente, como observa-se na tabela 6.

Tabela 7 – Resumo dos Perfis Adotados

VÃOS (metros)	RESUMO
3,00	Perfil Formado a Frio
4,00	Perfil Formado a Frio
6,00	Perfil Laminado
8,00	Perfil Laminado
10,00	Perfil Laminado
12,00	Perfil Laminado

Fonte: Autoria própria (2019)

A tabela 6, é um resumo da verificação dos perfis para todos os estados limites atuantes. Todos os valores abaixo de 1,00, significam que o perfil atende a todos os critérios de verificação.

Tabela 8 – Verificação dos Perfis

VÃOS (metros)	PERFIS ADOTADOS	VERIFICAÇÃO DO PERFIL
3,00	2 Ue 90 x 40 x 12 x 2,30	0,927
4,00	2 Ue 140 x 40 x 12 x 2,70	0,944
6,00	W 200 x 15,0	0,976
8,00	W 310 x 21,0	0,983
10,00	W 310 x 32,7	0,974
12,00	W 360 x 44,0	0,952

Fonte: Autoria própria (2019)

5 CONCLUSÃO

A proposta do presente trabalho objetivou avaliar o desempenho estrutural aliado ao menor consumo de aço de vigas mistas aço-concreto, compostas por perfis laminados, soldados e formados a frio, simplesmente apoiadas em temperatura ambiente, por meio de planilhas de cálculo do Excel, onde foram considerados todos os parâmetros necessários para o cálculo de vigas mistas.

Para os cálculos, considerou-se uma laje maciça com espessura de 10 cm, biapoiadas em vigas mistas, ora, com perfis laminados, soldados ou formados a frio, concreto com f_{ck} igual 30 kN/cm² e conectores do tipo pino com cabeça. A partir dessas considerações foi possível ressaltar, que de acordo com o carregamento considerado, que é um carregamento tipo de um edifício residencial, existe uma correlação entre o vão e o tipo de perfil mais recomendado para resistir aos esforços solicitantes. Assim, conclui-se que para vãos menores, até 6,00 metros, o perfil mais recomendado é o perfil formado a frio, e para vãos maiores, iguais ou superiores a 6,00 metros, o perfil mais recomendado é o perfil laminado. O perfil soldado também é uma solução para vãos iguais ou maiores que 6,00 metros, porém se tornam, na maioria das vezes, menos atrativos, devido ao custo de fabricação ser mais alto do que dos perfis laminados.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomendam-se os seguintes temas:

- Análise estrutural de vigas mistas em perfis formados a frio com abertura na alma;
- Análise estrutural de vigas mistas com interação parcial em situações de incêndio.

6 REFERÊNCIAS

ALVA, G. M. S. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto**. 2000. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2017.

FABRIZZI, M. A. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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

FIGUEIREDO, L. M. B. **Projeto e Construção de pilares mistos aço-concreto**. 1998. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

OLIVEIRA, L. C. **Estudo comparativo entre estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto aplicadas a edifícios de múltiplos andares**. 2018. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

QUEIROZ, G., PIMENTA, R. J., MATA, L. A. C. **Elementos das estruturas mistas aço-concreto**. Belo Horizonte: O Lutador, 2001.

QUEIROZ, G. **Estruturas Híbridas e Mistas de Aço e Concreto**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/noticias-detahes.php?cod=6155>>. Acesso em: 14 jan. 2019.

SCHMITZHAUS, F. **Perfis Estruturais de Aço: o que é um perfil laminado?**. Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://felipeschmitzhaus.blogspot.com/2015/04/perfis-estruturais-de-aco-o-que-e-um.html>>. Acesso em: 14 jan. 2019. (a)

SCHMITZHAUS, F. **Você sabe o que é um perfil CS, VS e CVS?**. Porto Alegre, 2015. Disponível em: < <http://felipeschmitzhaus.blogspot.com/2015/04/voce-sabe-o-que-e-um-perfil-cs-vs-e-cvs.html>>. Acesso em: 14 jan. 2019. (b)

SILVA, V. P., FRUCHTENGARTEN, J. **Dimensionamento de estruturas de aço**. 2012. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SOARES, C. H. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio em situação de incêndio**. 2002. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

VERÍSSIMO, G. S. **Análise e Comportamento de vigas de aço e vigas mistas com aberturas na alma**. 1996. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.