

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL

ALEXANDRE LUVIZOTTI LOPES
GABRIELA CAVASSIN

**ANÁLISE DO GRAU DE INTERAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS AÇO E
CONCRETO DE UMA VIGA MISTA BIPOIADA PARA LINHAS
FÉRREAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2013

ALEXANDRE LUVIZOTTI LOPES
GABRIELA CAVASSIN

**ANÁLISE DO GRAU DE INTERAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS AÇO E
CONCRETO DE UMA VIGA MISTA BIPOIADA PARA LINHAS
FÉRREAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
em Engenharia de Produção Civil da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,
como requisito parcial para Obtenção do título
de Engenheiro.

Orientador: Prof. João Elias Abdalla Filho, Ph.D.

CURITIBA
2013

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO GRAU DE INTERAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS AÇO E CONCRETO DE UMA VIGA MISTA BIAPOIADA PARA LINHAS FÉRREAS

Por

ALEXANDRE LUVIZOTTI LOPES
GABRIELA CAVASSIN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 26 de setembro de 2013, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – João Elias Abdalla Filho, Ph.D.
UTFPR

Prof. Elisabeth Penner, Doutora
UTFPR

Prof. José Manoel Caron, Mestre
UTFPR

RESUMO

LUVIZOTTI LOPES, Alexandre; CAVASSIN, Gabriela. Um estudo da interação entre os elementos aço e concreto de uma viga mista biapoiada para linhas férreas. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil). Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

Este trabalho estuda a interação entre os elementos estruturais de aço e concreto de uma viga mista que ocorre por meio dos conectores de cisalhamento, especificamente para linhas férreas de alta velocidade. Como objetivo, foi desenvolvido um estudo teórico sobre linhas férreas de alta velocidade e estruturas mistas aço-concreto e também traz o dimensionamento de uma viga mista biapoiada. Como resultado, foi possível comparar os valores de resistência e rigidez da estrutura com diferentes graus de interação entre os componentes, concluindo que mesmo com uma grande diminuição no grau de interação há pouca redução na resistência.

Palavras-chave: Viga mista aço-concreto. Interação aço-concreto. Linha férrea de alta velocidade.

ABSTRACT

LUVIZOTTI LOPES, Alexandre; CAVASSIN, Gabriela. Um estudo da interação entre os elementos aço e concreto de uma viga mista biapoiada para linhas férreas. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil). Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

This work studies the interaction of concrete and steel elements of a composite beam designed for a high speed railway. This work aims at performing a literature review on high speed railways and composite steel-concrete beams and at designing a simply supported composite beam. Result was a comparison of stiffness and bending resistance values for different degrees of interaction, showing there is a little reduction of resistance capacity due to partial interaction between slab and beam.

Key-words: Steel-concrete composite beam. Steel-concrete Interaction. High speed railway.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Perfil de referência do UIC do gabarito cinemático para linhas de alta velocidade (medidas em milímetros).....	15
Figura 2 — Dimensões do trilho UIC60 (medidas em milímetros) com indicação das partes do perfil	16
Figura 3 — Ilustração representativa da bitola de uma via férrea	17
Figura 4 — Distribuição geométricas dos esforços verticais para trens-tipo genéricos.....	18
Figura 5 — Perfil do trem Siemens Velaro D.....	19
Figura 6 — Distribuição dos pontos de carga (eixos) para o trem Velaro D (medidas em metros)	20
Figura 7 — Relação L/δ de comprimento do vão sobre deslocamento vertical para pontes ferroviárias simplesmente apoiadas correspondente à aceleração vertical $b_v = 1 \text{ m/s}^2$ para um trem à velocidade constante de V [km/h].	21
Figura 8 — Exemplo do sistema de lajes mistas - Steel Deck CE-75.....	22
Figura 9 — Alguns tipos mais usuais de vigas mistas.....	23
Figura 10 — Ilustração da ação mista em vigas.....	24
Figura 11 — Relação força-deslizamento nos conectores	25
Figura 12 — Tipos usuais de conectores de cisalhamento: pino com cabeça e perfil U laminado.	26
Figura 13 — Conectores do tipo Perfobond e conector de chapa dentada.	26
Figura 14 — Transferência de forças de cisalhamento longitudinal.....	28
Figura 15 — Disposição das armaduras transversais (adicionais) na laje de concreto	29
Figura 16 — Distribuição de tensões de compressão na laje de concreto.....	29
Figura 17 — Distribuição de tensões em vigas mistas de alma cheia sob momento positivo (interação completa)	32
Figura 18 — Distribuição de tensões em vigas mistas de alma cheia sob momento positivo (interação parcial)	33
Figura 19 — Fluxograma de desenvolvimento dos cálculos e verificações do trabalho (dados de entrada sombreados).....	37

Figura 20 — Representação tridimensional da viga mista do estudo desse trabalho em perspectiva incluindo os trilhos da linha férrea sobre ela	38
Figura 21 — Geometria da viga mista adotada (medidas em milímetros)	39
Figura 22 — Trem de carga aplicado sobre o modelo da viga mista em estudo (medidas em metro)	42
Figura 23 — Gráfico da envoltória das linhas de influência do momento fletor solicitante da carga móvel.....	44
Figura 24 — Gráfico da envoltória das linhas de influência do esforço cortante solicitante da carga móvel.....	44
Figura 25 — Gráfico da variação do Momento Fletor Resistente em função do Grau de Interação	47
Figura 26 — Gráfico da variação do Esforço Cortante Resistente em função do Grau de Interação	48
Figura 27 — Gráfico da variação do Deslocamento Vertical em função do Grau de Interação	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Valores máximos das linhas de influência de momentos fletores e esforços cortantes solicitantes devidos à carga móvel do trem ao longo da viga mista (valores máximos na viga destacados em negrito)	43
Tabela 2 — Resultados obtidos da variação do Grau de Interação	46
Tabela 3 — Resultado com o menor e maior número de conectores a atender os requisitos predefinidos para a viga mista em estudo	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Cargas dos trens-tipo	18
Quadro 2 — Grau de conforto em função da aceleração vertical do vagão.....	21
Quadro 3 — Ações diretas consideradas separadamente	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	11
1.1.1	OBJETIVO GERAL.....	11
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	12
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	VARIÁVEIS CARACTERÍSTICAS DE TRENS E TRILHOS.....	14
2.1.1	GABARITO DE CARGA.....	14
2.1.2	PERFIL METÁLICO DA LINHA.....	15
2.1.3	BITOLA DA LINHA.....	16
2.1.4	CARGA MÓVEL APLICADA SOBRE OS TRILHOS.....	18
2.1.5	TREM PADRÃO PARA ALTAS VELOCIDADES.....	19
2.1.6	GRAU DE CONFORTO DOS PASSAGEIROS.....	20
2.2	VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO.....	21
2.2.1	INTERAÇÃO AÇO-CONCRETO.....	23
2.2.2	CONECTORES DE CISALHAMENTO.....	25
2.2.3	ARMADURA DA LAJE.....	27
2.2.4	LARGURA EFETIVA.....	29
2.2.5	RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR.....	30
2.2.6	RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE.....	34
2.2.7	DESLOCAMENTOS.....	35
3	ETAPAS METODOLÓGICAS	36
3.1	GEOMETRIA DA VIGA MISTA.....	38
3.1.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	39
3.1.1.1	CONCRETO.....	39
3.1.1.2	AÇO.....	40
3.1.2	CÁLCULO DAS SOLICITAÇÕES.....	41
3.1.2.1	SOLICITAÇÕES DAS CARGAS PERMANENTES.....	41
3.1.2.2	ESFORÇOS CAUSADOS PELA CARGA MÓVEL.....	41
3.1.2.3	COMBINAÇÃO DE ESFORÇOS SOLICITANTES.....	45
3.2	OBTENÇÃO DOS RESULTADOS.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46

4.1	RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR	47
4.2	RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE	48
4.3	DESLOCAMENTO VERTICAL DO SISTEMA E CONFORTO DOS USUÁRIOS 49	
4.4	INTERAÇÃO COMPLETA E INTERAÇÃO MÍNIMA	50
5	CONCLUSÕES	50
6	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52
	APÊNDICE A — MEMORIAL DE DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Segundo MALITE (1990), estudos quanto a sistemas mistos de aço e concreto tiveram início em 1914 na Inglaterra, quando a empresa *Redpath Brow ad Company* fez uma série de ensaios quanto ao uso de sistemas mistos para pisos. O assunto foi primeiro introduzido em norma em 1944, na AASHO (American Association of State Highway Officials), atualmente AASHTO.

Desde então, é possível observar estruturas criadas utilizando-se da tecnologia tanto no Brasil como no mundo, e de acordo com KIRCHHOF (2004), sendo mais empregadas em sistemas de pisos constituídos por vigas de aço e lajes de concreto em edifícios de múltiplos andares e pontes.

Vigas mistas são mais vantajosas que sistemas exclusivamente de concreto armado ou aço pois o primeiro resiste bem à compressão, com menor custo e o segundo trabalha bem à tração. As vigas mistas de aço e concreto têm também a vantagem de vencerem grandes vãos, característica desejada em estruturas para malhas ferroviárias urbanas elevadas e para linhas férreas em locais com relevo acidentado. O aspecto arquitetônico também é muito considerado neste tipo de empreendimento, devido ao impacto social causado, fazendo-se necessária uma estrutura leve e agradável esteticamente, reforçando a escolha de um sistema misto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é analisar o comportamento estrutural de uma viga mista aço-concreto a ser usada como ponte ou viaduto para uma linha férrea de alta velocidade em função do grau de interação dos elementos aço e concreto.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Otimizar o dimensionamento de uma viga mista com geometria adequada para as solicitações do uso da linha férrea de alta velocidade;
- Analisar os efeitos da variação do grau de interação aço-concreto na resistência da viga mista e na rigidez.

1.2 JUSTIFICATIVA

Como é noticiado nos meios de comunicação, o transporte rodoviário no Brasil está saturado, havendo a necessidade de se pensar em novos sistemas de transporte para o país, tanto para longas distâncias quanto para o transporte urbano.

Após muitos anos sem incentivos substanciais ao desenvolvimento da rede ferroviária brasileira (DNIT, 2013), esse assunto começa a ganhar força nas esferas políticas do país e no conhecimento da população em função do lançamento do projeto Trem de Alta Velocidade Brasileiro (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES 2013); no entanto a baixa quantidade de publicações recentes sobre o tema de transporte ferroviário no Brasil e soluções construtivas e estruturais relacionadas a ele mostra que o tema não tem sido abordado na maioria dos cursos de graduação em engenharia pelo país.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho delimita-se pela análise e dimensionamento de uma viga mista biapoiada de aço-concreto com 30 m de vão.

O dimensionamento da viga mista seguirá principalmente as recomendações do Anexo O da ABNT NBR 8800 (2008), salvo exceções em que normas internacionais serão aplicadas na falta de normativa vigente no Brasil.

O carregamento estudado para a viga desconsiderará os efeitos horizontais longitudinais, como de aceleração, frenagem e choque entre veículos, efeitos horizontais transversais, como o vento e efeitos da aceleração centrípeta do trem e

ações impostas pelas irregularidades da via, considerando somente os efeitos verticais de peso próprio dos materiais constituintes da estrutura e a carga móvel do trem, assim como uma simplificação do efeito dinâmico representado por um coeficiente de majoração.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esse texto se desenvolve em três partes principais, sendo elas a fundamentação teórica, as etapas metodológicas e a análise dos resultados.

Na primeira, são descritas as equações que regem o tema de vigas mistas e as especificações de trens e linhas férreas de alta velocidade que sejam relevantes ao dimensionamento da viga mista que servirá de ponte ou viaduto para essa linha.

Na segunda, é mostrado como se realiza o dimensionamento da viga mista desse trabalho e os cálculos de verificação que a estrutura deve passar.

Na terceira, os resultados são descritos e discutidos afim de se concluir como o grau de interação entre o aço e o concreto da viga mista influencia a resistência e o conforto dos usuários do trem de alta velocidade que utilizam a via.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse tópico propõe-se a compilar o desenvolvimento teórico sobre trens e ferrovias de alta velocidade e o dimensionamento de vigas mistas a partir de diversas fontes, incluindo livros do assunto, normas técnicas e textos acadêmicos, assim como conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia de Produção Civil da UTFPR.

2.1 VARIÁVEIS CARACTERÍSTICAS DE TRENS E TRILHOS

De forma a ter-se as cargas atuantes sobre a estrutura da viga mista e sua geometria é necessário conhecer algumas variáveis que quantificam e qualificam tanto a linha férrea quanto o trem que vai trafegar sobre essa linha.

2.1.1 GABARITO DE CARGA

Como definido no folheto normativo UIC 505-6 (2006) da União Internacional de Caminhos de Ferro, o gabarito cinemático de carga é um perfil que a maior seção transversal de um trem não pode ultrapassar com este em movimento. O gabarito considera as dimensões máximas que o trem pode ter e a movimentação lateral que ele possa vir a sofrer durante o movimento. É usado para determinar o posicionamento de objetos fixos em relação à linha férrea de modo que de passagem o trem não colida com esses objetos, como muros, viadutos e túneis dispostos ao redor da via.

A Figura 1 ilustra o gabarito cinemático de carga da UIC que linhas de alta velocidade devem disponibilizar aos trens que a percorrem.

Para esse trabalho será usada a informação da largura máxima do gabarito ($2 \times 1645 \text{ mm} = 3290 \text{ mm}$) como base para a definição da largura do tabuleiro de concreto da viga mista estudada.

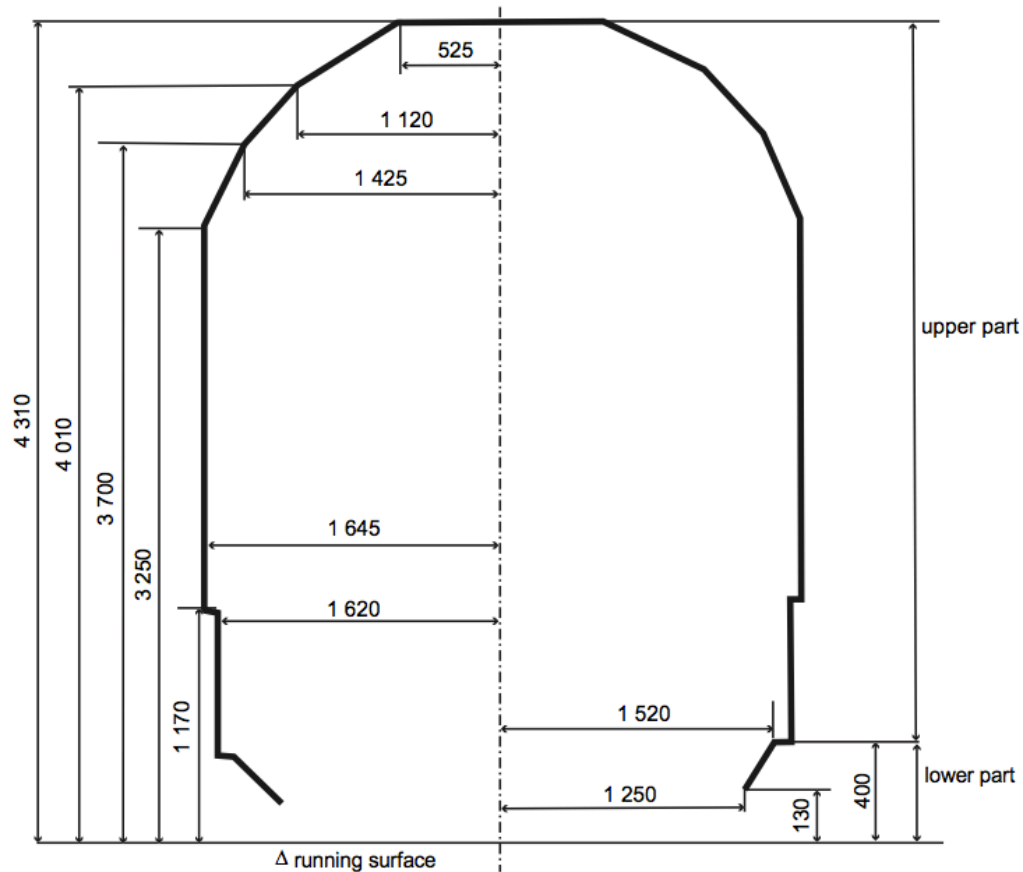


Figura 1 — Perfil de referência do UIC do gabarito cinemático para linhas de alta velocidade (medidas em milímetros)

Fonte: UIC 505-6 (2006)

2.1.2 PERFIL METÁLICO DA LINHA

Para linhas férreas de alta velocidade, FONSECA (2010) especifica que o trilho recomendado é o UIC60, definido pela especificação UIC 861-3 (1969) da União Internacional de Caminhos de Ferro e com suas dimensões expostas na Figura 2.

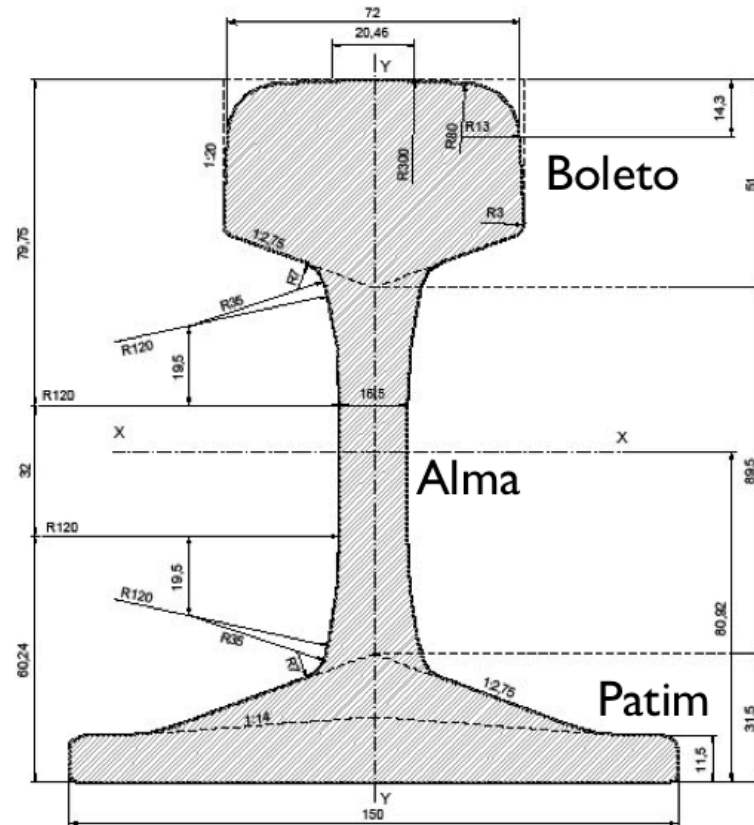


Figura 2 — Dimensões do trilho UIC60 (medidas em milímetros) com indicação das partes do perfil
 Fonte: Adaptado de UIC 861-3 (1969)

O dado da largura do boleto do perfil (72 mm) será usado para a determinação da distância entre eixos da viga mista estudada.

Segundo o catálogo Trilhos ArcelorMittal (2009), a massa linear desse perfil é 60,34 kg/m. Esse dado será usado no cálculo do peso próprio da estrutura da viga mista desse trabalho.

2.1.3 BITOLA DA LINHA

Segundo BORGES NETO (2011), a bitola da linha é uma das características mais importantes de uma via férrea, já que ela define tanto o traçado da ferrovia quanto a velocidade de operação e a exploração econômica que será aproveitada dessa linha.

A bitola é definida como a distância entre as faces internas de duas barras de trilho medida 16 mm abaixo do plano de rodagem desse trilho, como ilustrado pela Figura 3.

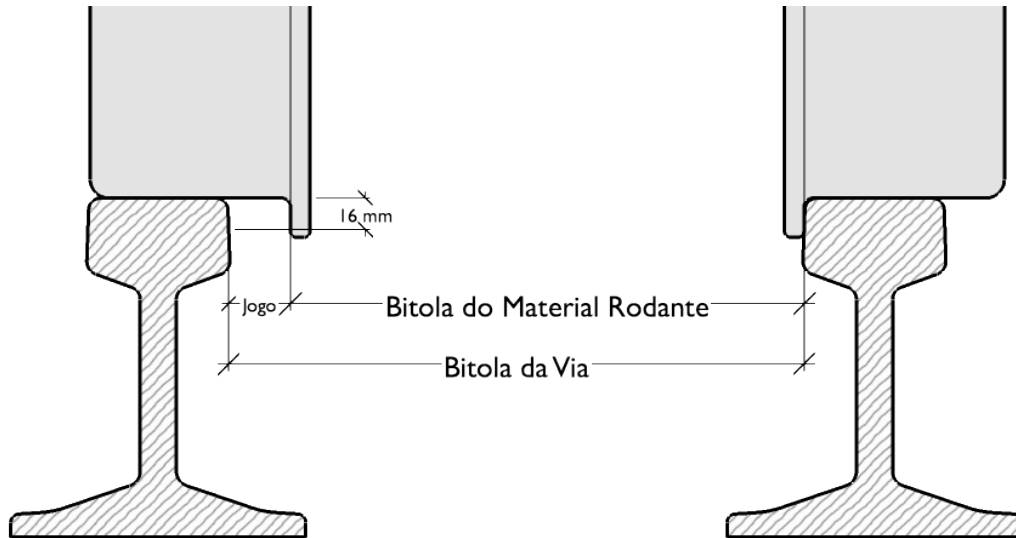


Figura 3 — Ilustração representativa da bitola de uma via férrea
Fonte: Adaptado de BRINA (1982).

A bitola é definida 16 mm abaixo do plano de rodagem por essa ser a medida mínima dos frisos internos das rodas dos trens, fazendo com que o “jogo” das rodas nos trilhos seja sempre constante.

A “Bitola Padrão Internacional” foi definida em 1907 em Berna, na Suíça, como sendo 1,435 m.

No Brasil a “Bitola Métrica”, de 1 m, é a mais empregada, mas o país conta ainda com linhas que possuem a “Bitola Larga” (1,6 m) e outras bitolas não usuais, o que dificulta muito a interligação do sistema ferroviário brasileiro. Apesar da presença de linhas com bitola mista de 1 e 1,6 m (utilizando duas barras de trilho afastadas de 1,6 m e uma barra intermediária afastada de 1 m de uma das barras laterais) possibilitar alguma integração de trens feitos para bitolas diferentes, a quantidade dessas ferrovias de bitola mista é muito pequena em comparação com as outras bitolas já empregadas no país.

Como as novas linhas de alta velocidade planejadas para o Brasil terão por princípio ser um sistema isolado da atual malha ferroviária e adotarão a bitola internacional, essa será usada no dimensionamento da viga mista estudada por esse trabalho.

2.1.4 CARGA MÓVEL APLICADA SOBRE OS TRILHOS

De acordo com a ABNT NBR 7189 (1985) existem quatro trens-tipo que devem ser utilizados nos projetos ferroviários no país, dependendo do uso da ferrovia, que são: TB-360 (carregamento de minério ou carga equivalente), TB-270 (transporte de carga geral), TB-240 (para verificação e reforço de estruturas existentes) e TB-170 (vias exclusivas para trens de passageiros), descritos no Quadro 1. Para cada trem-tipo é definido uma carga por eixo e a geometria básica do carregamento vertical sugerido a ser utilizado nos cálculos. A Figura 4 mostra a forma genérica dessa geometria, onde as cargas pontuais Q representam os eixos das rodas de um vagão do trem e as cargas distribuídas q e q' representam respectivamente vagões adjacentes cheios e vazios.

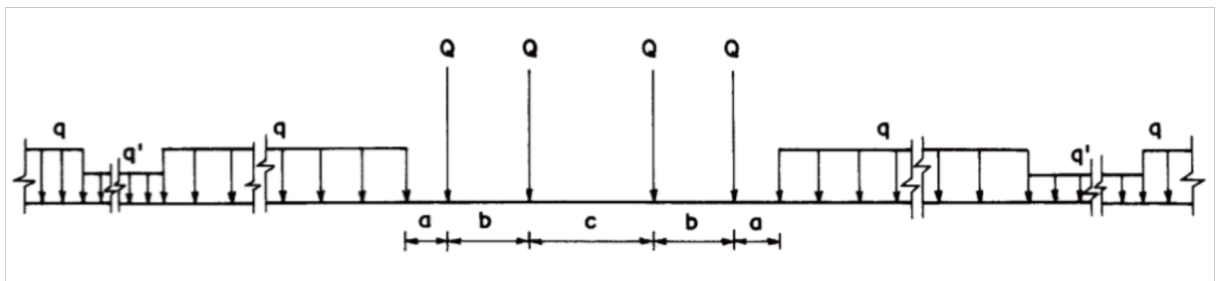


Figura 4 — Distribuição geométrica dos esforços verticais para trens-tipo genéricos.
Fonte: ABNT NBR 7189 (1985).

Trem-tipo	Q (kN)	q (kN/m)	q' (kN/m)	a (m)	b (m)	c (m)
TB-360	360	120	20	1,00	2,00	2,00
TB-270	270	90	15	1,00	2,00	2,00
TB-240	240	80	15	1,00	2,00	2,00
TB-170	170	25	15	11,00	2,50	5,00

Quadro 1 — Cargas dos trens-tipo
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7189 (1985).

Ainda, permite-se utilizar a distribuição real dos pontos de apoio de cargas do trem que trafegará na via a ser projetada no caso de ela ser mais conservadora que a norma.

Segundo ALIAS (1984), a resistência vertical da linha é simples de se estudar, baseado na linha de influência das cargas verticais aplicadas. A resistência longitudinal normalmente não precisa ser calculada, pois as cargas envolvidas são

principalmente de aceleração e frenagem e são esforços já limitados em função do conforto dos passageiros, o que faz com que simplesmente um perfil de trilho que suporte as cargas verticais resista também às cargas longitudinais.

Já a resistência às cargas horizontais transversais, segundo BORGES NETO (2011), é de grande complexidade de cálculo, pois depende de muitos fatores, como curvatura da linha, conicidade da roda do trem, velocidade, entre outros e, apesar de poder ser simplificada, não está no escopo desse trabalho.

Tendo-se as cargas que agem sobre os trilhos, transfere-as para os dormentes ou diretamente para a base de concreto. No caso de vias sobre laje ainda é recomendado apoiar os trilhos sobre um fino aparelho de apoio em neoprene, de forma a absorver as vibrações que passariam dos trilhos à laje.

2.1.5 TREM PADRÃO PARA ALTAS VELOCIDADES

Dos trens de alta velocidade existentes no mercado mundial e compatíveis com as especificações da futura rede de alta velocidade brasileira todos atendem a especificação do TB-170, com no máximo 170 kN por eixo, mas o que traz uma distribuição de eixos e um número de eixos mais solicitante à estrutura é o Siemens Velaro D, que tem seu perfil exposto na Figura 5.



Figura 5 — Perfil do trem Siemens Velaro D
Fonte: Adaptado de High-Speed Trainset Velaro D Datasheet (2010).

De acordo com o *High-Speed Trainset Velaro D Datasheet* (2010), o trem Velaro D é uma composição de 8 vagões que se estende por 200 m.

Cada um dos 8 vagões possui 4 eixos, sendo dois eixos motores e dois eixos livres. Assim não há a necessidade de um vagão motor (locomotiva), permitindo acomodar mais passageiros ao longo dos 200 m do comprimento do trem.

O padrão de distribuição dos eixos do trem é detalhado na Figura 6 e repete-se ao longo de toda a composição.

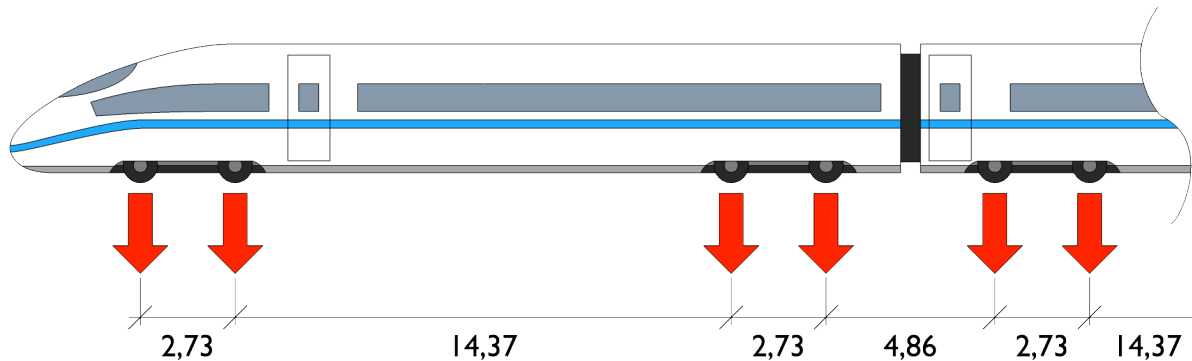


Figura 6 — Distribuição dos pontos de carga (eixos) para o trem Velaro D (medidas em metros)
Fonte: Adaptado de High-Speed Trainset Velaro D Datasheet (2010).

Usando essa distribuição de eixos juntamente com a carga por eixo definida no TB-170 da ABNT NBR 7189 (1985) (Quadro 1) tem-se o trem de carga a ser utilizado para o cálculo das solicitações de carga móvel sobre a viga mista.

2.1.6 GRAU DE CONFORTO DOS PASSAGEIROS

O Anexo A2 da Norma Europeia EN1990 (2001) dispõe que o conforto do passageiro em um trem em velocidade constante que passa por uma ponte é função direta da aceleração vertical (b_v) que o vagão sofre e, por sua vez, a aceleração vertical que o trem está sujeito é função da velocidade do trem e do deslocamento vertical (δ) que a ponte sofre com a passagem do trem.

O Quadro 2 mostra os graus de conforto e a aceleração vertical máxima tolerada.

Grau de conforto	Aceleração vertical b_v (m/s^2)
Muito bom	1,0
Bom	1,3
Aceitável	2,0

Quadro 2 — Grau de conforto em função da aceleração vertical do vagão
Fonte: Adaptado de EN1990 (2001)

A Figura 7 mostra qual a relação L/δ em cada velocidade V causa uma aceleração vertical $b_v = 1 m/s^2$. Ainda, para se ter a relação L/δ para outras acelerações b_v basta dividir a relação L/δ pelo b_v desejado.

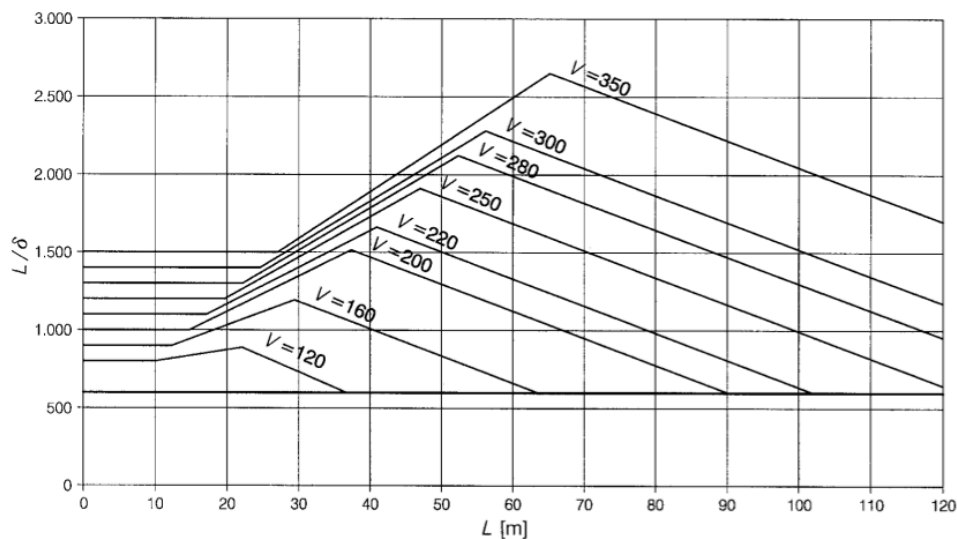


Figura 7 — Relação L/δ de comprimento do vão sobre deslocamento vertical para pontes ferroviárias simplesmente apoiadas correspondente à aceleração vertical $b_v = 1 m/s^2$ para um trem à velocidade constante de V [km/h].
Fonte: EN1990 (2001)

Com esses dados é possível verificar qual será o nível de conforto dos passageiros para a viga mista estudada. Também pode-se relacionar diretamente uma redução no deslocamento vertical δ da viga mista com o aumento do conforto dos passageiros do trem.

2.2 VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO

O Anexo O da ABNT NBR 8800 (2008) trata do dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto, e as define como sendo 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 acima da sua face superior. Neste trabalho será estudado um sistema composto por duas vigas com perfil I.

Para que os componentes de aço e concreto hajam como um conjunto resistindo a flexão, é necessário uma ligação mecânica entre os materiais, criada através dos conectores de cisalhamento.

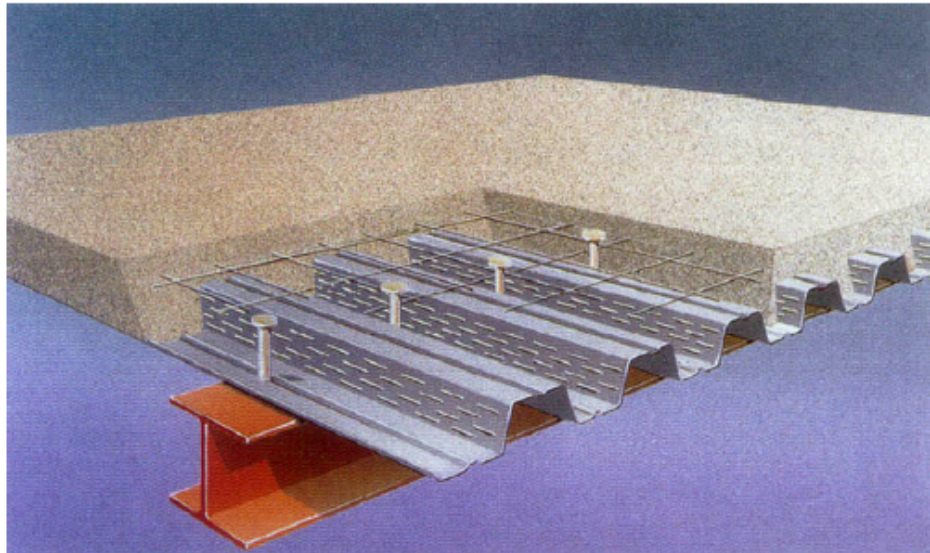


Figura 8 — Exemplo do sistema de lajes mistas - Steel Deck CE-75
Fonte: TRISTÃO (2002).

De acordo com KIRCHHOF (2004), a associação da viga de aço com a laje de concreto resulta em um elemento de maior rigidez e resistência, resultando na redução dos elementos estruturais e conseqüente diminuição de custos. Esse tipo de solução é muito empregado em sistemas de pisos constituídos por vigas de aço e lajes de concreto de edifícios e pontes. A Figura 9 mostra alguns tipos de vigas mistas.

Ainda de acordo com a ABNT NBR 8800 (2008), as vigas mistas podem ser biapoiadas, contínuas ou semicontínuas. Sistemas biapoiados são tidos como os mais eficientes pois desse modo o componente de aço trabalha predominantemente à tração e a laje de concreto à compressão e é o sistema adotado neste trabalho.

O comportamento estrutural da viga mista é influenciado pelo método construtivo da laje de concreto. Em casos em que a laje é escorada, em por exemplo, uma forma de aço incorporada, a viga de aço não recebe o carregamento

causado pelo concreto. Se não houver escoramento, a viga de aço recebe todo o carregamento da laje isoladamente, deste modo, o sistema misto não está constituído durante a fase construtiva e implicando na necessidade de se fazer verificações na viga de aço para os esforços da etapa construtiva.

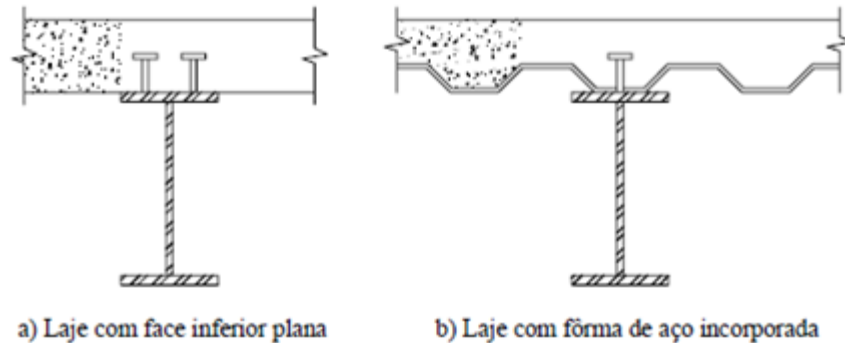


Figura 9 — Alguns tipos mais usuais de vigas mistas
Fonte: MALITE(1990).

2.2.1 INTERAÇÃO AÇO-CONCRETO

Segundo CHAVES (2009), a ação mista é desenvolvida quando existe uma ligação na interface entre os elementos de aço e concreto capaz de resistir aos fluxos cisalhantes gerados, permitindo então que os dois materiais se deformem como um único elemento. Se não existe conexão na interface os dois materiais se deformam de modo independente provocando um deslizamento relativo, como visto na Figura 10.

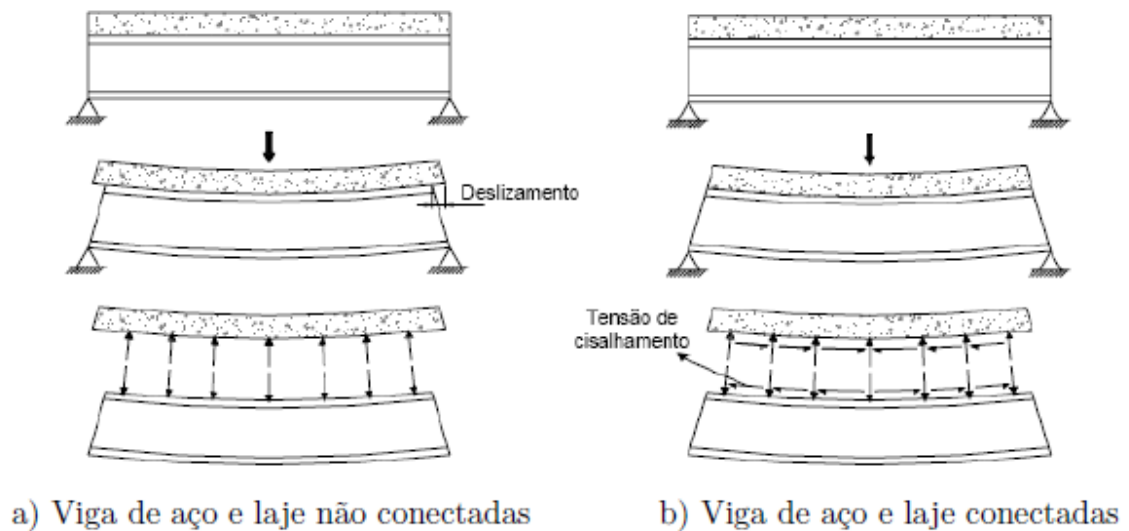


Figura 10 — Ilustração da ação mista em vigas
Fonte: CHAVES (2009).

A NBR 8800 (2008) define o grau de interação da viga mista η na seguinte equação:

$$\eta = \frac{\sum Q_{Rd}}{F_d} \quad (1)$$

sendo,

- $\sum Q_{Rd}$ o somatório das forças resistentes de cálculo individuais Q_{Rd} dos conectores de cisalhamento situados entre a seção de momento positivo máximo e a seção adjacente de momento nulo;
- F_d a força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje de concreto, igual ao menor valor entre $A_a f_{ydc}$ e $0,85 f_{cd} b t_c$.

De acordo com MALITE (1990), quando há interação completa entre os elementos ($\eta \geq 1$), o colapso se dará pelo escoamento da viga de aço ou ruptura da laje de concreto. Quando há interação parcial ($\eta < 1$), a resistência nominal dos conectores é inferior à da viga de aço e à da laje de concreto, ou seja, o colapso se dará pela insuficiência da conexão.

Segundo o mesmo autor, adotando-se um grau de conexão parcial ($\eta = 0,5$), verificou-se uma perda de resistência de 15% em relação a conexão completa ($\eta = 1$), possibilitando uma redução em até 50% do número de conectores.

O autor ressalta o fato de que os espaçamentos mínimos estabelecidos em normas devem ser seguidos, o que pode impossibilitar o uso de conexões parciais.

2.2.2 CONECTORES DE CISALHAMENTO

De acordo com CHAVES (2009), conectores de cisalhamento tem a função de transferir forças de cisalhamento longitudinais e impedir a separação vertical (*uplift*) entre a laje e a viga. Eles podem ser rígidos ou flexíveis, dependendo do comportamento do conector ao fluxo cisalhante aplicado na viga, como mostra a Figura 11.

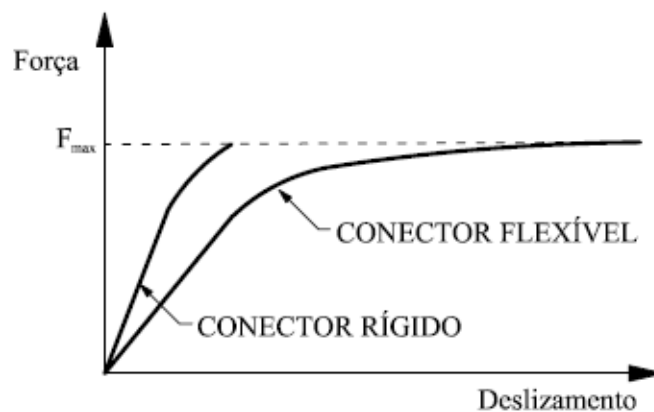


Figura 11 — Relação força-deslizamento nos conectores
Fonte: CHAVES (2009).

Conforme à Figura 11, conectores flexíveis, sob carregamento crescente, continuam a se deformar mesmo após atingir a sua resistência máxima, sem que haja ruptura.

A distribuição dos esforços cisalhantes na viga não é uniforme, concentrando-se nas extremidades, fato que justificaria um espaçamento não-uniforme de conectores ao longo da viga. Na prática, de acordo com KIRCHHOF (2004), o comportamento dúctil dos conectores permite uma redistribuição de cisalhamento longitudinal, de modo que o conector sofra deformação sem ocorrer a ruptura, permitindo que os conectores vizinhos também atinjam suas capacidades máximas. É utilizado então um espaçamento uniforme sem ocasionar a perda na resistência máxima da conexão.

Ensaio executados em CHAPMAN (1964 apud KIRCHHOF, 2004) indicaram que não há diferença no comportamento entre vigas com conectores igualmente distribuídos e aqueles com distribuição não uniforme, portanto, se opta pelo espaçamento uniforme devido a maior facilidade na execução.

Atualmente, dois tipos de conectores (ambos flexíveis) são largamente utilizados: os pinos com cabeça (*stud bolts*) e os perfis U laminados. Na Figura 12 pode-se ver um pino com cabeça soldada no perfil metálico e também conectores de perfil U, onde um pequeno comprimento do perfil U é cortado e soldado na viga de aço.

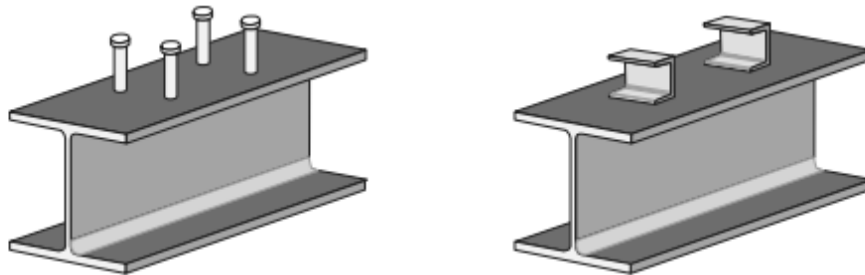


Figura 12 — Tipos usuais de conectores de cisalhamento: pino com cabeça e perfil U laminado.
Fonte: TRISTÃO (2002)

Conectores em chapa contínua também vêm sendo pesquisados no Brasil e apresentam maior rigidez para cargas de serviço do que os studs. Em VERÍSSIMO et al. (2008) é apresentado projeto e resultados de ensaios para os conectores Perfobond e conector de chapa dentada, como mostra a Figura 13.

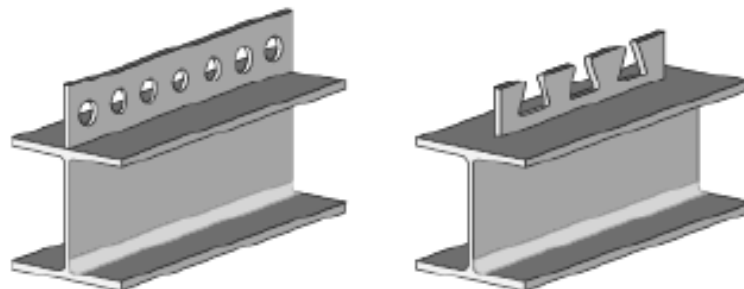


Figura 13 — Conectores do tipo Perfobond e conector de chapa dentada.
Fonte: VERÍSSIMO (2007)

A NBR 8800 (2008) apresenta expressões obtidas através de ensaios para o cálculo das resistências desses conectores quando embutidos em laje maciça ou com forma de aço incorporada.

Para pinos com cabeça soldados na viga de aço, adotar menor valor entre:

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (2)$$

$$Q_{Rd} = \frac{A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (3)$$

sendo,

- A_{cs} - área da seção transversal do conector;
- f_{ck} - resistência característica à compressão do concreto;
- E_c - módulo de elasticidade do concreto;
- f_{ucs} - resistência à ruptura do aço do conector.
- γ_{cs} - coeficiente de ponderação da resistência do conector igual a 1,25;

Para perfil U laminado, adotar:

$$Q_{Rd} = \frac{0,3(t_{fcs} + 0,5t_{ws})L_{cs}\sqrt{f_{ck}E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (4)$$

sendo,

- t_{fcs} - espessura da mesa do conector, tomada a meia distância entre a borda livre e a face adjacente da alma em mm;
- t_{ws} - espessura da alma do conector em mm;
- L_{cs} - comprimento do conector em mm;

Os perfis U têm como vantagem ter mão-de-obra e montagem de baixo custo. Os pinos com cabeça são de fácil montagem e instalação, porém o custo do pino em si é mais alto.

2.2.3 ARMADURA DA LAJE

A transferência de forças cisalhantes longitudinais das lajes de concreto para a viga de aço no caso de conectores do tipo pino com cabeça é feita conforme ilustra a Figura 14.

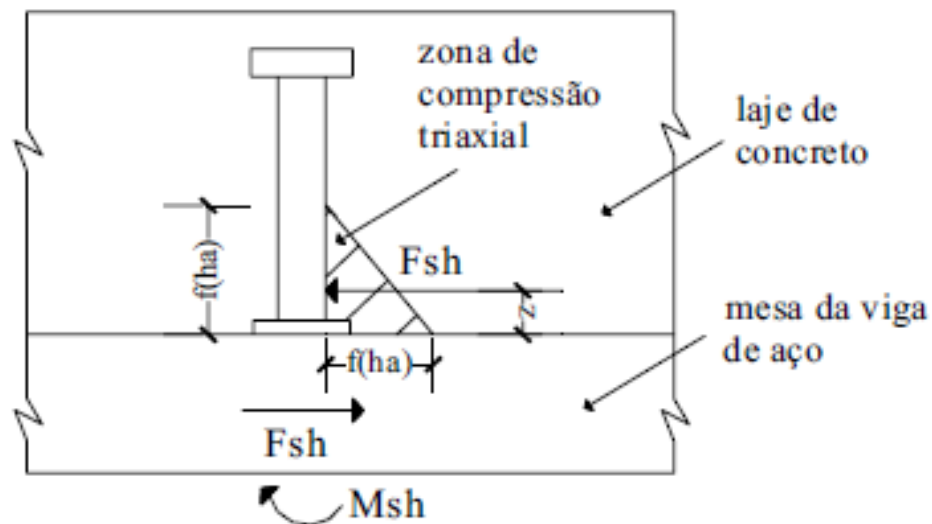


Figura 14 — Transferência de forças de cisalhamento longitudinal
Fonte: CHAVES (2009).

Segundo OEHLERS E PARK (1992 apud CHAVES, 2009), o conector é submetido a força de cisalhamento F_{sh} , que gera um momento M_{sh} ; essas forças atuantes resultam em tensões de cisalhamento e normais aplicadas ao corpo do conector. A magnitude dessas tensões depende da força F_{sh} e da excentricidade z , que é função da rigidez relativa entre o concreto e o conector.

TRISTÃO (2005) observou que em casos de ruptura há uma redução da resistência e rigidez do concreto na zona de compressão triaxial, causando então a fissuração da laje nessa região. A NBR 8800 (2008) recomenda armaduras de costura para impedir a propagação destas fissuras, como mostra a Figura 15.

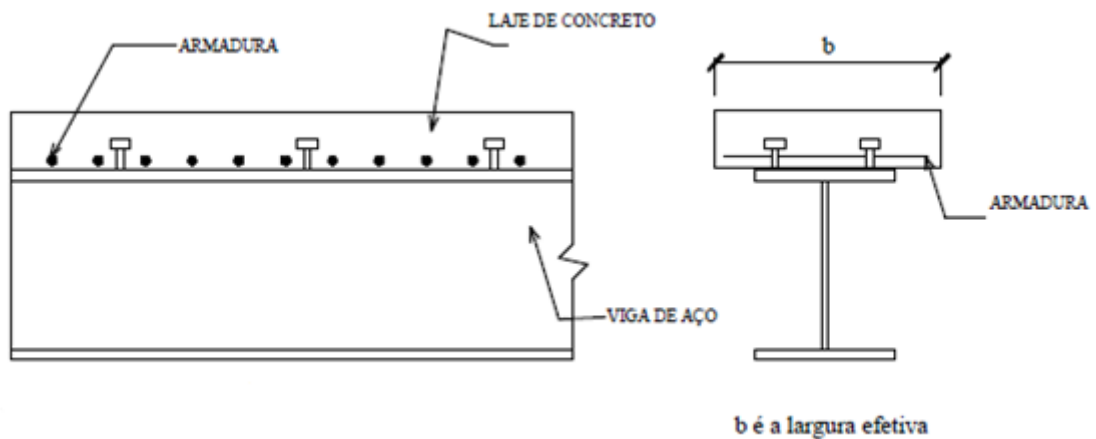


Figura 15 — Disposição das armaduras transversais (adicionais) na laje de concreto
 Fonte: Adaptado de TRISTÃO (2002).

Segundo MALITE (1990), a maioria das normas estrangeiras permite considerar a contribuição da armadura longitudinal contida na laje de concreto em regiões de momento negativo, diferente da norma brasileira, que apenas considera a armadura para controle de fissuração.

2.2.4 LARGURA EFETIVA

A distribuição de tensões de compressão na laje de concreto não são uniformes. A Figura 16 mostra como os trechos distantes do eixo da viga de aço pouco colaboram para resistir aos esforços de compressão.

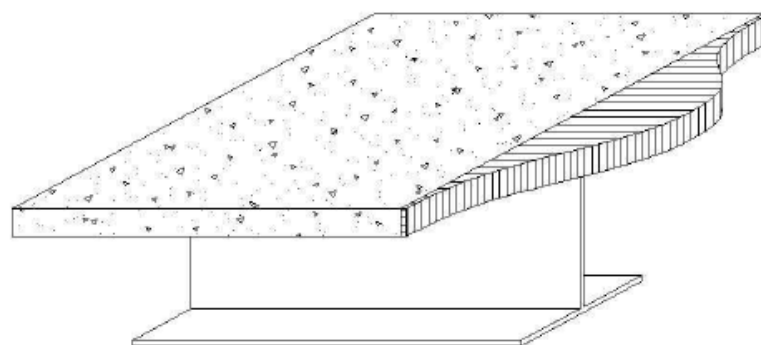


Figura 16 — Distribuição de tensões de compressão na laje de concreto
 Fonte: CARDOSO (2006).

A ABNT NBR 8800 (2008) traz valores para cálculo da largura efetiva de lajes em vigas mistas biapoiadas, contínuas, semicontínuas e em balanço. Para as biapoiadas, de cada lado da linha de centro da viga deve ser igual ou menor dos seguintes valores:

- 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro de apoios;
- metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

2.2.5 RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR

A NBR 8800 (2008) classifica as seções de aço para vigas biapoiadas como compactas e semcompactas para efeitos de cálculo de momento fletor resistente. A norma traz também valores de momento resistente baseados na posição da linha neutra; porém neste trabalho serão abordados apenas casos em que a linha neutra se encontra na seção de aço, para garantir assim um melhor aproveitamento da seção quanto aos esforços de tração.

a) Seções compactas: $h/t_w \leq 3,76 \sqrt{E/f_y}$

Neste caso, as seções podem ser dimensionadas usando as propriedades plásticas da seção mista. O coeficiente 0,85 corresponde aos efeitos de longa duração atuantes no concreto.

- Interação completa e linha neutra no perfil de aço:

$$C_{cd} = 0,85f_{cd}bt_c \quad (5)$$

$$C_{ad} = \frac{1}{2}(A_a f_{yd} - C_{cd}) \quad (6)$$

$$T_{ad} = C_{ed} + C_{ad} \quad (7)$$

sendo,

- h a altura da alma, tomada como distância entre faces internas das mesas;
- t_w a espessura da alma;
- E o módulo de elasticidade do aço;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;

- f_{cd} a resistência de cálculo do concreto à compressão;
- b a largura efetiva da laje de concreto;
- t_c a altura da laje de concreto;
- A_a a área do perfil de aço;
- f_{yd} a resistência de cálculo do aço à tração.
- C_{cd} a força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto;
- C_{ad} a força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço;
- T_{ad} a força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço;

A posição da linha neutra, a partir do topo da viga de aço pode ser determinada das seguintes formas:

- Linha neutra na mesa superior - $C_{ad} \leq A_{af}f_{yd}$

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{af}f_{yd}} t_f \quad (8)$$

- Linha neutra na alma - $C_{ad} > A_{af}f_{yd}$

$$y_p = t_f + h \frac{(C_{ad} - A_{af}f_{yd})}{A_{aw}f_{yd}} \quad (9)$$

sendo,

- A_{af} a área da mesa do perfil de aço;
- A_{aw} a área da alma do perfil de aço;
- t_f a espessura das mesas inferior e superior;
- y_p a distância da linha neutra da seção plastificada até a face superior do perfil de aço;

O momento resistente de cálculo M_{Rd} e dado por:

$$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{t_c}{2} + d - y_t \right) \quad (10)$$

sendo,

- y_c a distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil;

- y_t a distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face inferior desse perfil;
- d é a altura total do perfil de aço;

A Figura 17 mostra a distribuição de tensões em vigas compactas com interação completa em regiões de momento positivo e as possíveis posições da linha neutra.

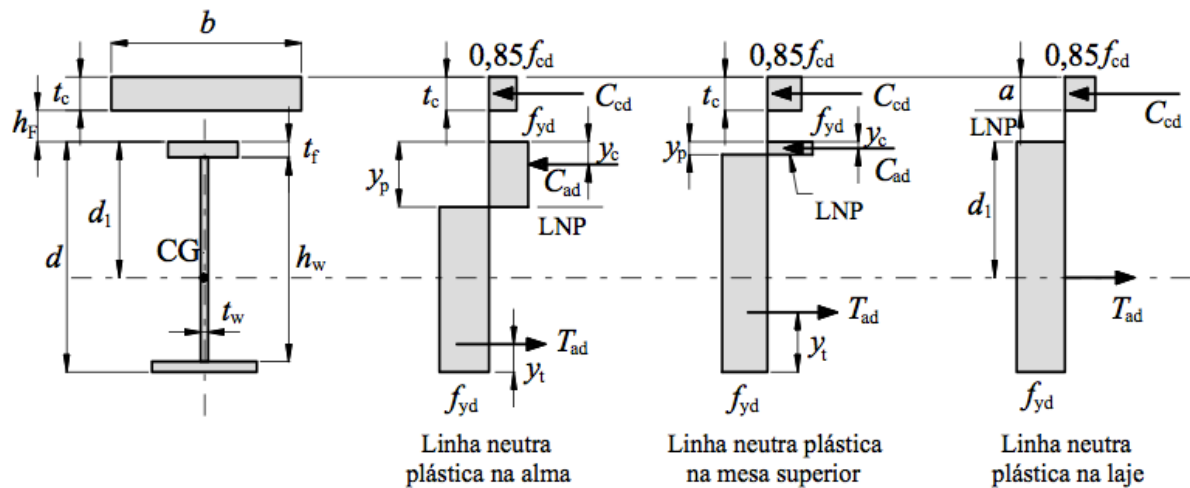


Figura 17 — Distribuição de tensões em vigas mistas de alma cheia sob momento positivo (interação completa)

Fonte: ABNT NBR 8800 (2001)

- Interação parcial

O momento resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + d - y_t \right) \quad (11)$$

sendo a a espessura da região comprimida da laje, ou para interação parcial, a espessura considerada efetiva, calculada pela expressão:

$$a = \frac{C_{cd}}{0,85f_{cd}b} \quad (12)$$

A Figura 18 mostra a distribuição de tensões em vigas compactas com interação parcial em regiões de momento positivo e as possíveis posições da linha neutra.

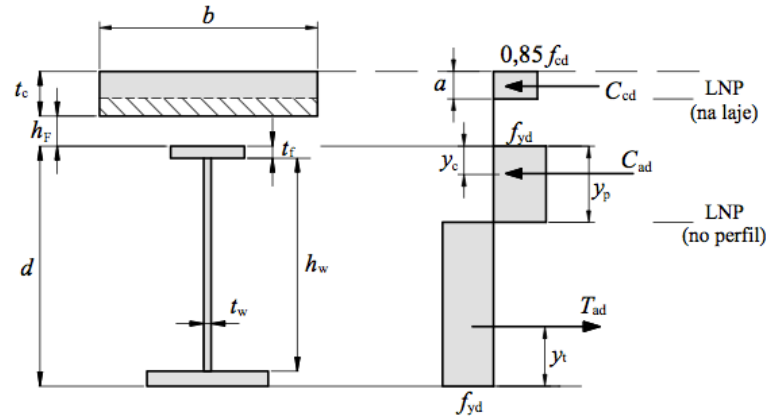


Figura 18 — Distribuição de tensões em vigas mistas de alma cheia sob momento positivo (interação parcial)
 Fonte: ABNT NBR 8800 (2001)

b) Seções semi-compactas: $3,76 \sqrt{E/f_y} < h/t_w \leq 5,70 \sqrt{E/f_y}$

Neste caso, as seções podem ser dimensionadas usando as propriedades elásticas da seção mista. As tensões no concreto e no aço devem ser limitadas, de acordo com a NBR 8800 (2008). A tensão de tração de cálculo na face inferior do perfil de aço σ_{td} não deve ultrapassar f_{yd} e a tensão de compressão de cálculo na face superior da laje de concreto σ_{cd} não deve ultrapassar f_{cd} .

$$\sigma_{td} = \frac{M_{Sd}}{(W_{tr})_i} \quad (13)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{M_{Sd}}{\alpha_E [(W_{tr})_s]} \quad (14)$$

sendo,

- M_{Sd} o momento fletor solicitante de cálculo;
- $(W_{tr})_i$ e $(W_{tr})_s$ os módulos de resistência elástico inferior e superior da viga mista;

As tensões correspondentes ao momento de cálculo M_d devem ser determinadas com base nas propriedades da seção homogeneizada, representadas pela razão modular α_E . Nota-se que a componente de tração do concreto é ignorada. A posição da linha neutra deve ser obtida admitindo distribuição de tensões linear na seção homogeneizada.

$$\alpha_E = \frac{E}{E_C} \quad (15)$$

Para situações de interação parcial, deve-se considerar o deslocamento relativo na interface da viga, altera-se o valor de $(W_{tr})_i$ pelo módulo de elástico efetivo W_{ef} :

$$W_{ef} = W_a + \sqrt{\frac{\Sigma Q_{Rd}}{F_{hd}}} [(W_{tr})_i - W_a] \quad (16)$$

sendo,

- W_a o módulo de resistência elástico inferior do perfil de aço.

2.2.6 RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE

A NBR 8800 (2008) recomenda que seja considerada apenas a resistência do perfil de aço para determinação da força cortante resistente da viga mista. De acordo com o item 5.4.3.1 da mesma norma, seções I tem a força cortante de cálculo V_{Rd} dada pelas seguintes equações, de acordo com a esbeltez do perfil:

- para $\lambda \leq \lambda_p$: $V_{Rd} = \frac{0,6A_{aw}f_y}{\gamma_{a1}}$
- para $\lambda_r < \lambda \leq \lambda_p$: $V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{0,6A_{aw}f_y}{\gamma_{a1}}$
- para $\lambda > \lambda_r$: $V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 \frac{0,6A_{aw}f_y}{\gamma_{a1}}$

Considerando os seguintes parâmetros de esbeltez:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (17)$$

$$\lambda_p = 1,1 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (18)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (19)$$

e os coeficientes seguintes:

$$k_v = 5, \text{ para } \frac{e}{h} > 3 \text{ ou } \frac{e}{h} > \left[\frac{260}{h/t_w}\right]^2$$

$$k_v = 5 + \frac{5}{(e/h)^2}, \text{ para todos os outros casos.}$$

sendo,

- λ o parâmetro de esbeltez;
- λ_p o parâmetro de esbeltez limite para seções compactas;
- λ_r o parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas;
- V_{Rd} a força cortante resistente de cálculo;
- e a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes;
- γ_{a1} o coeficiente de minoração de resistência.

2.2.7 DESLOCAMENTOS

Segundo a NBR 8800 (2008), os cálculos para determinação dos deslocamentos devem tomar como base uma análise elástica. Nas regiões de momento positivo, deve-se utilizar o momento de inércia efetivo, dado por:

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}}} (I_{tr} - I_a) \quad (20)$$

sendo,

- I_a o momento de inércia da seção do perfil de aço isolado;
- I_{tr} o momento de inércia da seção mista homogeneizada;
- I_{ef} o momento de inércia efetivo.

Nos casos em que há interação parcial, pode-se usar o valor do módulo de resistência elástico efetivo W_{ef} definido no item anterior.

A NBR 8800 (2008) recomenda também que sejam considerados os efeitos de retração do concreto e de fluência (longa duração). Para ações permanentes, as propriedades geométricas da seção mista devem ser obtidas por meio da homogeneização teórica da seção, dividindo a largura efetiva da laje de concreto por uma razão modular $\alpha_E = E/E_c$, sendo E e E_c os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

Não há na NBR 8800 (2008) valor máximo admissível para deslocamento vertical, tornando necessário o uso de parâmetros de normativa internacional, exposta no item 2.1.6 deste trabalho.

3 ETAPAS METODOLÓGICAS

A sequência de cálculos e verificações feitas nesse trabalho são mostradas de forma geral na Figura 19 em forma de fluxograma e em seguida é feito o detalhamento desses cálculos ao longo desse capítulo.

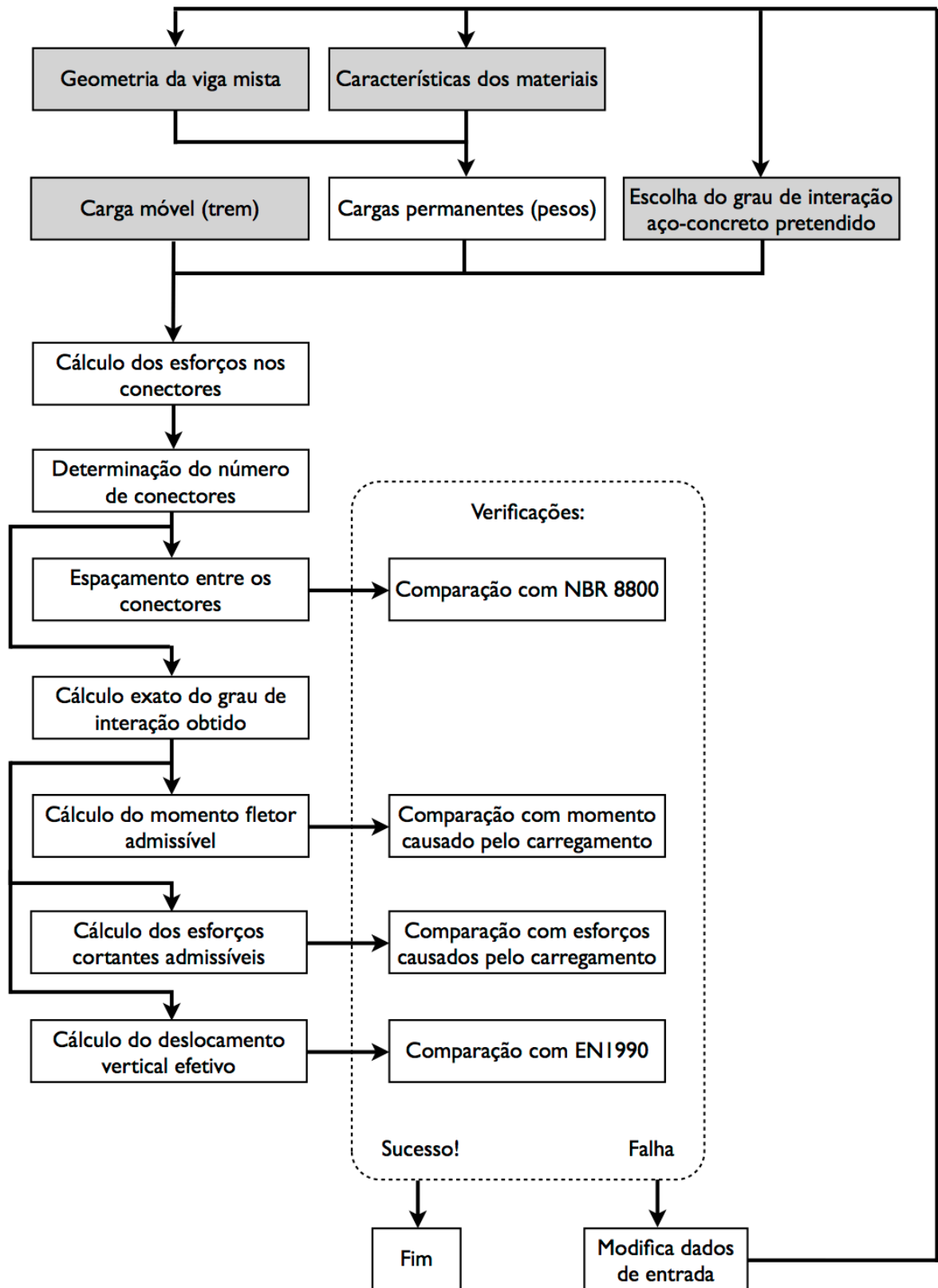


Figura 19 — Fluxograma de desenvolvimento dos cálculos e verificações do trabalho (dados de entrada sombreados)

Fonte: Autores.

3.1 GEOMETRIA DA VIGA MISTA

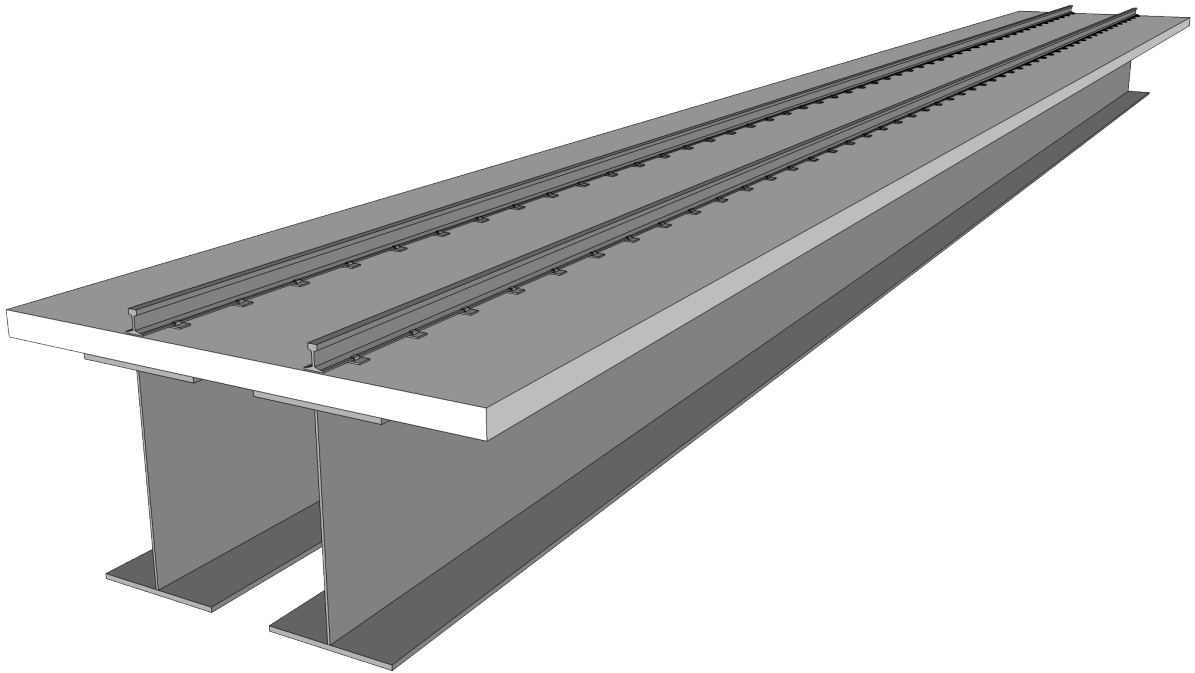


Figura 20 — Representação tridimensional da viga mista do estudo desse trabalho em perspectiva incluindo os trilhos da linha férrea sobre ela

Fonte: Autores.

Na Figura 20 vê-se uma representação tridimensional da viga mista com vão de 30 metros a ser simplesmente apoiada pelas nas extremidades sobre pilares aqui não representados.

A Figura 21 mostra um desenho esquemático da elevação longitudinal e da seção transversal da viga mista escolhida. A largura da laje de concreto foi tomada em função do gabarito de carga da linha, exposto no item 2.1.1 desse trabalho. Os eixos dos trilhos foram posicionados levando em consideração a bitola da linha de 1,435 m (descrita em 2.1.3) e a largura do boleto do perfil do trilho (mostrado em 2.1.2). Esses coincidem com os eixos verticais das vigas metálicas e dos conectores de cisalhamento.

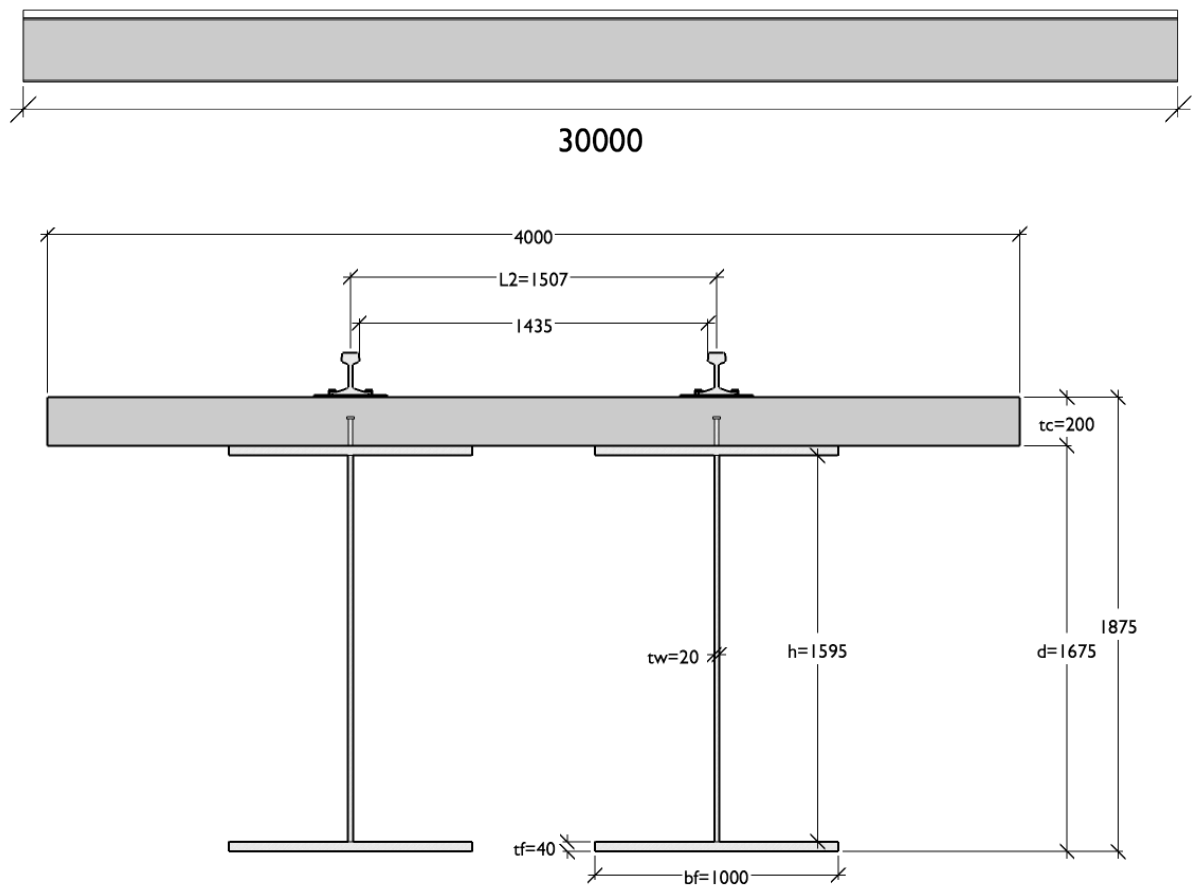


Figura 21 — Geometria da viga mista adotada (medidas em milímetros)
 Fonte: Autores.

A geometria analisada atende aos esforços solicitantes típicos de linhas férreas propostos neste trabalho.

3.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1.1 CONCRETO

O concreto utilizado no dimensionamento tem resistência característica à compressão f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias, sendo considerado um coeficiente de minoração de resistência $\gamma_c = 1.4$ para valores de cálculo:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (21)$$

O módulo de elasticidade secante, utilizado nas análises é determinado pela equação, recomendada pela NBR 8800 (2008):

$$E_{cs} = 0.85E_{ci} \quad (22)$$

sendo E_{ci} o módulo de elasticidade definido por:

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (23)$$

O valor adotado para massa específica de concreto armado considerado por norma é:

$$\rho_c = 2500 \frac{kg}{m^3}$$

A dilatação térmica do concreto foi desprezada no dimensionamento.

3.1.1.2 AÇO

Para o dimensionamento das vigas, o aço considerado foi o ASTM A588, com resistência ao escoamento f_y igual a 345 MPa de acordo com a NBR 8800 (2008), e um coeficiente de minoração de resistência $\gamma_{a1} = 1.1$ para valores de cálculo:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (24)$$

O módulo de elasticidade indicado pela NBR 8800 (2008) e usado no dimensionamento foi:

$$E = 200 \text{ GPa}$$

e o valor adotado para massa específica:

$$\rho_a = 7850 \frac{kg}{m^3}$$

A dilatação térmica foi desprezada no dimensionamento.

Os conectores foram considerados do tipo pino com cabeça, soldados a mesa superior com solda contínua. O aço utilizado é o ASTM 108 Grau 1020, com resistência à ruptura f_{ucs} igual a 415 MPa.

3.1.2 CÁLCULO DAS SOLICITAÇÕES

Para o dimensionamento, foram considerados apenas os esforços de operação da estrutura, desprezando portanto os carregamentos e verificações das etapas construtivas, os esforços de retração do concreto, fadiga e variação de temperatura.

Ações horizontais como força de vento, força centrípeta, aceleração, frenagem e choques de veículos não foram consideradas no dimensionamento por também não fazerem parte do escopo desse trabalho.

3.1.2.1 SOLICITAÇÕES DAS CARGAS PERMANENTES

Foram consideradas como cargas permanentes os esforços de peso próprio das vigas de aço, da laje de concreto e dos trilhos.

Cada viga de aço de seção definida no item 3.1 contribui com 8,62 kN/m e a laje de concreto contribui com 19,61 kN/m.

O carregamento referente ao trilho da linha férrea utilizado foi obtido no catálogo Trilhos ArcelorMittal (2009) (mostrado no item 2.1.2) e é de 60,34 kg/m ou 0,59 kN/m por perfil de trilho.

3.1.2.2 ESFORÇOS CAUSADOS PELA CARGA MÓVEL

A carga móvel foi aplicada na viga mista como um trem de carga de acordo com os itens 2.1.4 e 2.1.5 deste trabalho e está representada na Figura 22 junto com o modelo 2D longitudinal da viga.

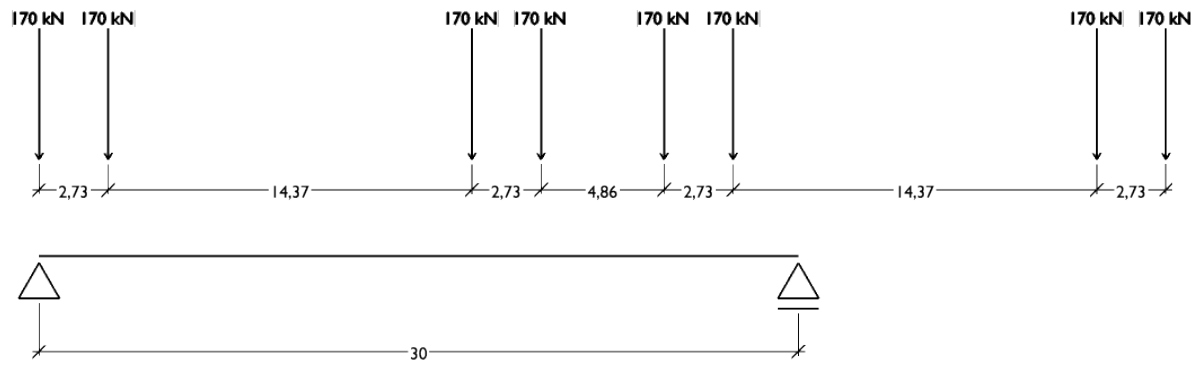


Figura 22 — Trem de carga aplicado sobre o modelo da viga mista em estudo (medidas em metro)
 Fonte: Autores.

A partir desse trem de carga móvel, por meio do programa *Ftool* (MARTHA 2012), foram obtidos os valores de momento fletor e forças cortantes ao longo do comprimento da viga mista, mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 — Valores máximos das linhas de influência de momentos fletores e esforços cortantes solicitantes devidos à carga móvel do trem ao longo da viga mista (valores máximos na viga destacados em negrito)

L (m)	M _{Sk.trem} (kN.m)	V _{Sk.trem} (kN)		L (m)	M _{Sk.trem} (kN.m)	V _{Sk.trem} (kN)	
0,00	0,00	607,80	0,00	15,20	3819,70	213,80	-225,10
0,40	237,50	594,20	-2,30	15,60	3834,50	202,50	-236,30
0,80	464,30	580,50	-4,50	16,00	3842,10	191,10	-245,70
1,20	680,30	567,00	-6,80	16,20	3843,00	185,50	-250,20
1,60	885,20	553,40	-9,10	16,40	3842,30	179,80	-254,80
2,00	1079,30	539,80	-11,30	16,80	3835,30	168,50	-263,80
2,40	1262,70	526,20	-13,60	17,20	3821,10	156,60	-272,90
2,80	1438,50	513,80	-16,30	17,60	3799,60	143,00	-282,00
3,20	1607,80	502,50	-20,80	18,00	3770,80	129,40	-291,00
3,60	1768,00	491,10	-25,30	18,40	3734,90	116,00	-300,10
4,00	1919,00	479,80	-29,90	18,80	3691,60	111,50	-309,20
4,40	2061,10	468,50	-34,40	19,20	3641,10	106,90	-318,20
4,80	2194,10	457,10	-38,90	19,60	3583,40	102,40	-327,30
5,20	2318,00	445,80	-43,50	20,00	3518,30	97,90	-336,40
5,60	2442,10	436,10	-48,00	20,40	3446,10	93,30	-345,40
6,00	2562,20	427,00	-52,50	20,80	3366,60	88,80	-354,50
6,40	2674,90	418,00	-57,10	21,20	3279,80	84,30	-363,60
6,80	2785,00	408,90	-61,60	21,60	3185,80	79,70	-372,60
7,20	2894,40	399,80	-66,10	22,00	3086,70	75,20	-381,70
7,60	2994,90	390,80	-70,70	22,40	2994,90	70,70	-390,80
8,00	3086,70	381,70	-75,20	22,80	2894,40	66,10	-399,80
8,40	3185,80	372,60	-79,70	23,20	2785,00	61,60	-408,90
8,80	3279,80	363,60	-84,30	23,60	2674,90	57,10	-418,00
9,20	3366,60	354,50	-88,80	24,00	2562,20	52,50	-427,00
9,60	3446,10	345,40	-93,30	24,40	2442,10	48,00	-436,10
10,00	3518,30	336,40	-97,90	24,80	2318,00	43,50	-445,80
10,40	3583,40	327,30	-102,40	25,20	2194,10	38,90	-457,10
10,80	3641,10	318,20	-106,90	25,60	2061,10	34,40	-468,50
11,20	3691,60	309,20	-111,50	26,00	1919,00	29,90	-479,80
11,60	3734,90	300,10	-116,00	26,40	1768,00	25,30	-491,10
12,00	3770,80	291,00	-129,40	26,80	1607,80	20,80	-502,50
12,40	3799,60	282,00	-143,00	27,20	1438,50	16,30	-513,80
12,80	3821,10	272,90	-156,60	27,60	1262,70	13,60	-526,10
13,20	3835,30	263,80	-168,50	28,00	1079,30	11,30	-539,70
13,60	3842,30	254,80	-179,80	28,40	885,20	9,10	-553,30
13,80	3843,00	250,20	-185,50	28,80	680,30	6,80	-566,90
14,00	3842,10	245,70	-191,10	29,20	464,30	4,50	-580,50
14,40	3834,50	236,30	-202,50	29,60	237,50	2,30	-594,10
14,80	3819,70	225,10	-213,80	30,00	0,00	0,00	-607,80

Fonte: Autores.

A envoltória dos esforços de momento fletor e força cortante obtidas estão apresentadas na Figura 23 e na Figura 24.

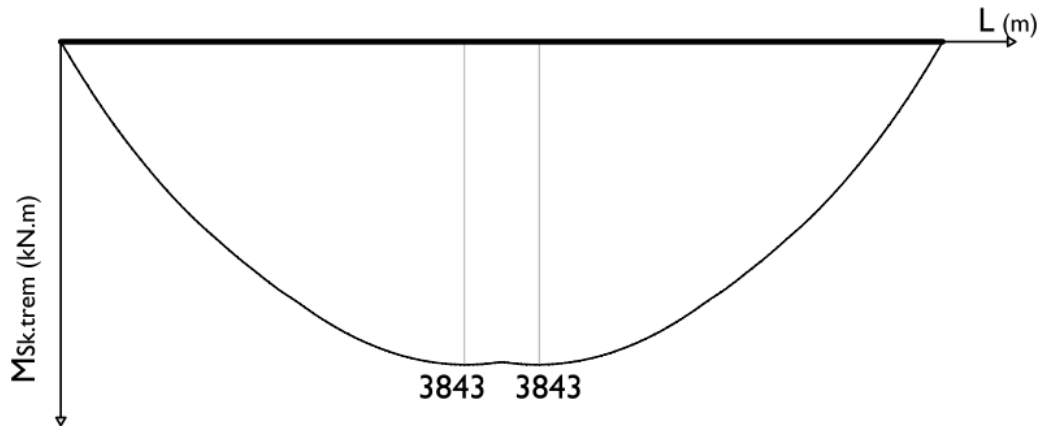


Figura 23 — Gráfico da envoltória das linhas de influência do momento fletor solicitante da carga móvel
Fonte: Autores.

O valor de 3843 kN.m como o momento fletor solicitante máximo foi considerado na seção média da viga para os efeitos dos cálculos desse trabalho.

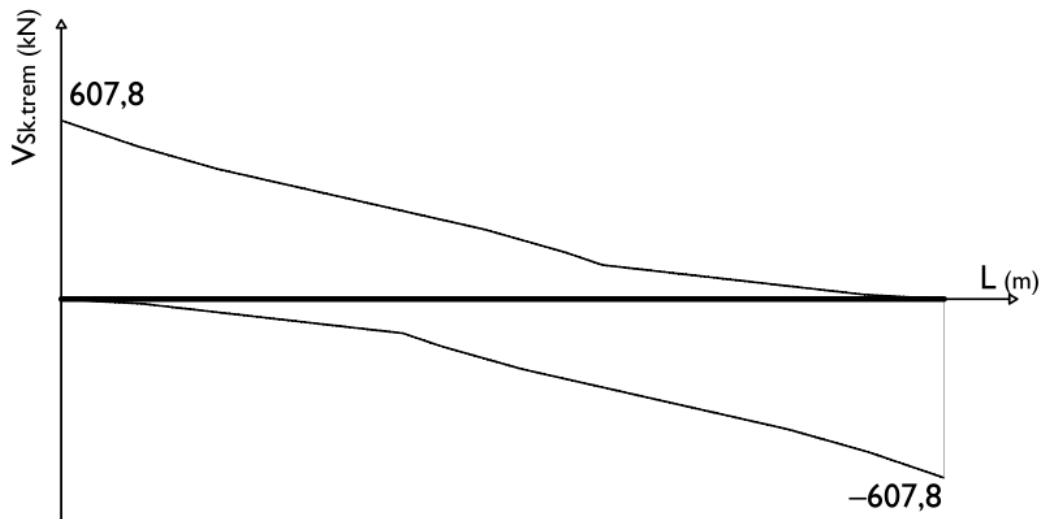


Figura 24 — Gráfico da envoltória das linhas de influência do esforço cortante solicitante da carga móvel
Fonte: Autores.

A consideração do efeito dinâmico das cargas móveis, de acordo com a ABNT NBR 7187 (2003), pode ser simplificada como sendo uma carga estática, por meio do coeficiente de impacto φ , definido conforme a equação 25.

$$\varphi = 0,001 (1600 - 60 \sqrt{L_t} + 2,25 \cdot L_t) \geq 1,2 \quad (25)$$

Dessa forma, os esforços provenientes da carga móvel podem simplesmente ser multiplicados pelo coeficiente de impacto na fase de combinação de esforços, descrita no item 3.1.2.3 na sequência.

3.1.2.3 COMBINAÇÃO DE ESFORÇOS SOLICITANTES

A combinação de esforços segue os valores de coeficiente descritos na ABNT NBR 8681 (2003). Os coeficientes de combinação de carregamento desfavorável estão demonstrados no Quadro 3.

Tipo de Ação	Coefficiente de Combinação γ
Peso próprio de estruturas metálicas	1,25
Peso próprio de estruturas de concreto	1,35
Ações variáveis limitadas (trem)	1,2

Quadro 3 — Ações diretas consideradas separadamente
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8681 (2003)

3.2 OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

Os cálculos foram feitos em uma planilha com a ajuda do software PTC Mathcad versão 14 (que encontra-se no APÊNDICE A — MEMORIAL DE DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS). Isso possibilitou a inicial otimização da seção da viga mista e o posterior cálculo repetitivo de vários graus de interação para a mesma seção da viga mista, como é mostrado no fluxograma na Figura 19.

Assim que as dimensões da viga mista foram definidas o grau de interação foi variado de 50% até 100% de 5 em 5% para a obtenção dos resultados que serão apresentados no item 4 desse trabalho.

Além disso verificou-se a quantidade mínima de conectores que atendem as recomendações das normas consideradas e a quantidade de conectores que atinge a classificação de “interação completa” para a viga. Esses dois últimos resultados também são apresentados no item 4 na sequência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse tópico são apresentados os resultados obtidos nos cálculos desse trabalho visando se concluir como o grau de interação entre o aço e o concreto da viga mista influencia a resistência, o deslocamento vertical e conseqüentemente o conforto dos usuários do trem de alta velocidade. Os cálculos foram feitos de acordo com a NBR 8800 (2008) e estão descritos no item 2.2.1 e no APÊNDICE A — MEMORIAL DE DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS deste trabalho.

Os resultados do cálculo onde se variou o grau de interação da viga mista mantendo a mesma seção e materiais são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 — Resultados obtidos da variação do Grau de Interação

Grau de Interação η	Deslocamento vertical δ (mm)	Momento Fletor Resistente M_{Rd} (kN.m)	Esforço Cortante Resistente V_{Rd} (kN)
50%	40,74	26911,61	4104,83
55%	40,52	27104,51	4104,83
60%	40,32	27288,66	4104,83
65%	40,13	27464,06	4104,83
70%	39,95	27630,71	4104,83
75%	39,77	27788,61	4104,83
80%	39,60	27937,76	4104,83
85%	39,44	28078,15	4104,83
90%	39,28	28209,80	4104,83
95%	39,13	28332,70	4104,83
100%	38,96	28446,84	4104,83

Fonte: Autores.

Nos tópicos 4.1, 4.2 e 4.3 estão analisadas cada tipo de resultado dessa tabela individualmente.

4.1 RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR

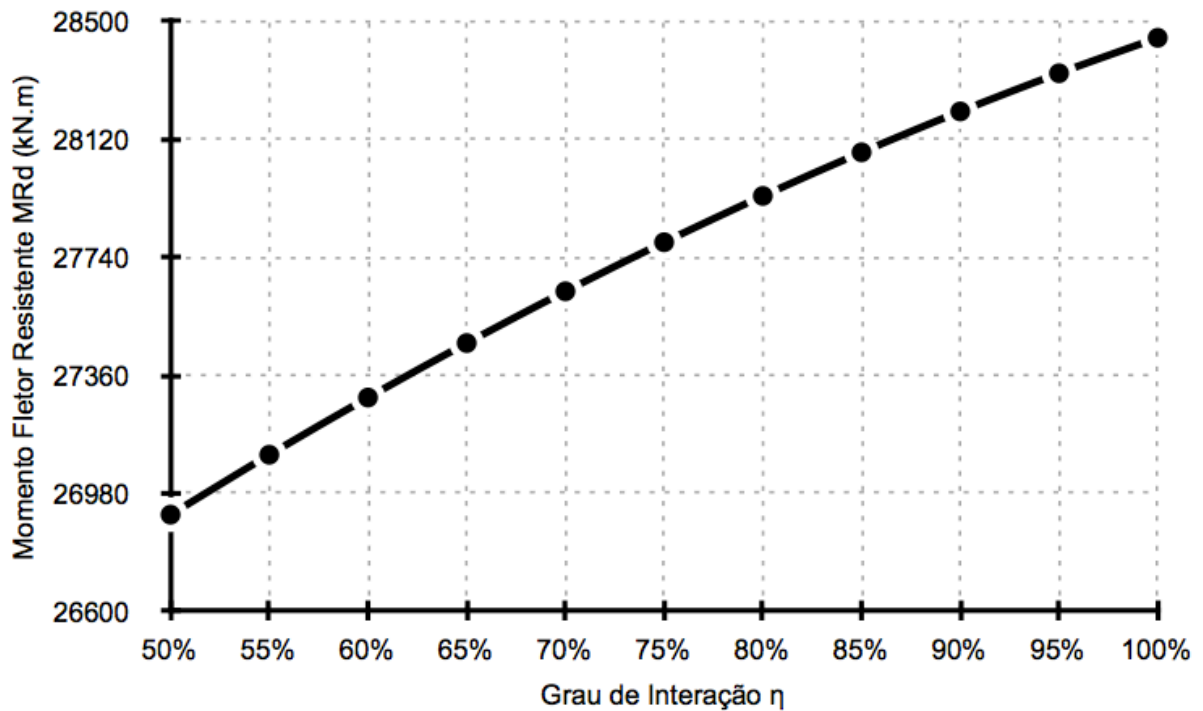


Figura 25 — Gráfico da variação do Momento Fletor Resistente em função do Grau de Interação
Fonte: Autores.

Os resultados obtidos mostram que há vantagens em adotar interações parciais, visto que com uma redução de 50% na quantidade de conectores de cisalhamento, obteve-se uma redução de apenas 5,4% (1535,23 kN.m) no momento fletor resistente, quando comparado com vigas de interação completa.

Isso pode facilitar a viabilização tanto financeira quanto técnica da adoção da solução estrutural viga mista em obras das mais diferentes naturezas pelo país.

Mas nem sempre essa diminuição do número de conectores se torna viável, já que há limitação superior e inferior no espaçamento desses conectores ao longo da viga e, eventualmente, pode haver alguma outra restrição na diminuição, como tratado no item 4.3 desse trabalho.

4.2 RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE

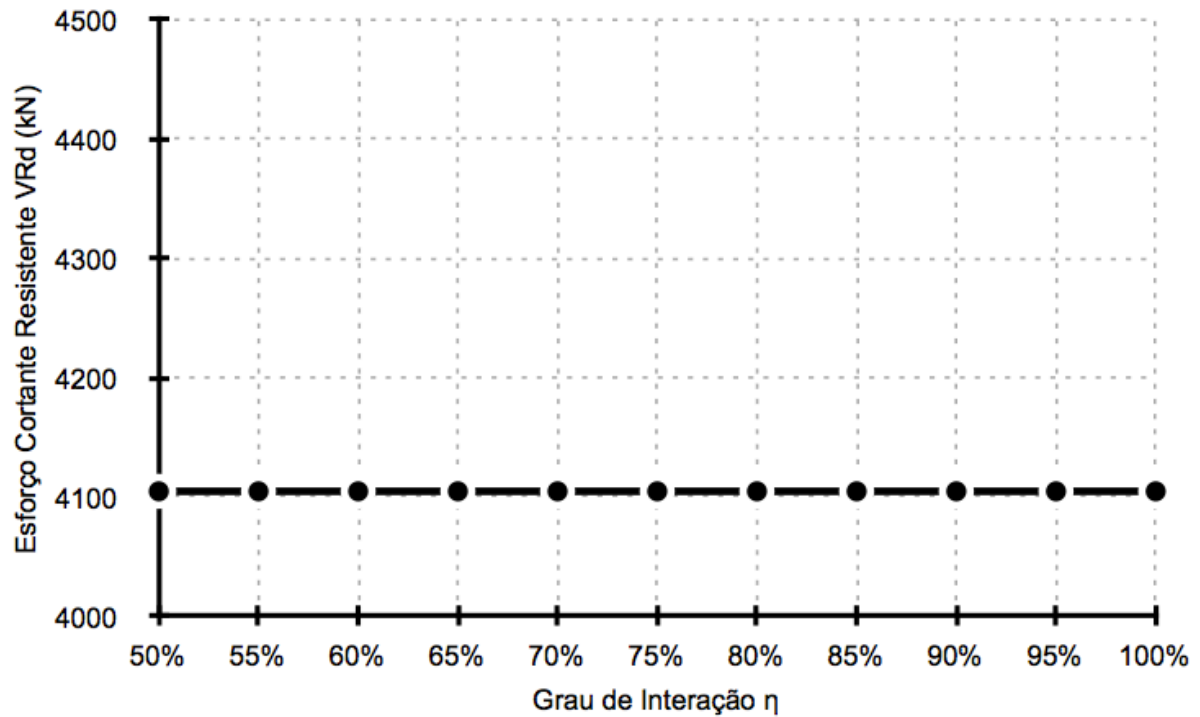


Figura 26 — Gráfico da variação do Esforço Cortante Resistente em função do Grau de Interação
Fonte: Autores.

Como os cálculos para resistência ao esforço cortante consideram apenas a alma do perfil de aço, é compreensível que a força cortante resistente apenas sofra alteração com a modificação da seção da alma do perfil e não com o grau de interação entre ele e o concreto, como ilustrado pelo gráfico de resultados da Figura 26.

4.3 DESLOCAMENTO VERTICAL DO SISTEMA E CONFORTO DOS USUÁRIOS

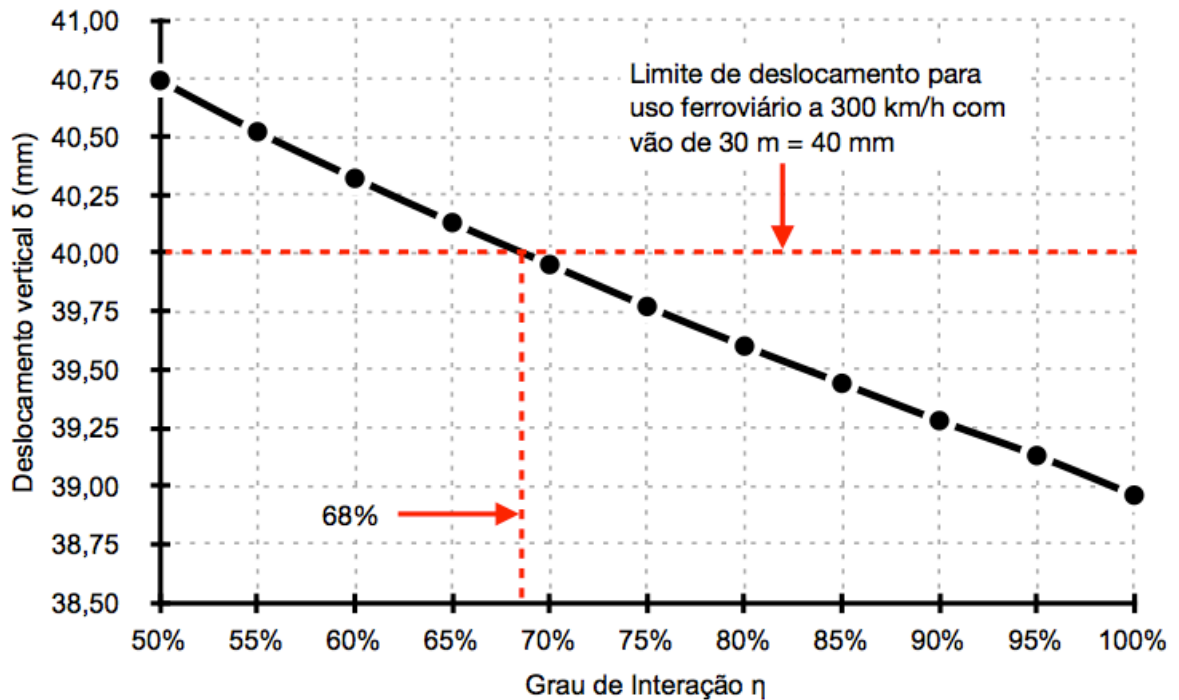


Figura 27 — Gráfico da variação do Deslocamento Vertical em função do Grau de Interação
Fonte: Autores.

Os resultados obtidos no comparativo de deformações também mostram que há vantagens em se adotar uma estrutura com grau de interação parcial. Pode-se reduzir a quantidade de conectores de cisalhamento em 50% resultando em um aumento no deslocamento de apenas 4,57% (1,78 mm) na viga mista estudada.

No entanto, essa pequena variação foi o suficiente para ultrapassar o limite de deslocamento vertical que mantem o conforto dos passageiros dentro do nível “aceitável” para essa viga mista específica. Como não existe parâmetros de deslocamentos máximos para vigas mistas em normas vigentes no Brasil, o fator “conforto dos passageiros” será o único limitante para a viga mista estudada em relação ao deslocamento vertical. Dessa forma, para graus de interação menores que 68% a viga mista desse estudo não atende os requisitos impostos, como assinalado no gráfico da Figura 27.

4.4 INTERAÇÃO COMPLETA E INTERAÇÃO MÍNIMA

Em função do grau de interação dos resultados exibidos nos itens anteriores pôde-se verificar a quantidade de conectores que são necessários para garantir uma interação completa dos elementos dessa viga mista e o número de conectores mínimo que faz com que a viga mista atenda todos os requisitos predefinidos, revelados na Tabela 3.

Tabela 3 — Resultado com o menor e maior número de conectores a atender os requisitos predefinidos para a viga mista em estudo

Grau de Interação η	68,59%	100%
Número total de conectores*	160	236
Momento Fletor Resistente MRd (kN.m)	27584,49	28446,84
Esforço Cortante Resistente VRd (kN)	4104,83	4104,83
Deslocamento vertical δ (mm)	40	38,96

*(4 vezes o apresentado na planilha, representando, assim, duas metades de viga de aço e duas vigas de aço por viga mista)

Fonte: Autores.

Considerando que a resistência ao momento fletor e à força cortante está superdimensionada em relação aos esforços solicitantes, o fator limitante nesse caso é o deslocamento vertical máximo para se conseguir um nível de conforto “aceitável” aos passageiros do trem que trafega por essa via.

Mesmo com essa limitação ainda é possível reduzir em 32% o número total de conectores da viga mista sem prejuízos contabilizados por esse trabalho.

Ainda, dependendo da aplicação da viga mista pode ser mais interessante financeiramente utilizar a interação completa e reduzir a seção de aço e concreto, mas essa análise não faz parte do escopo desse texto.

5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi abordado o assunto de dimensionamento de vigas mistas desde a obtenção dos esforços solicitantes (a partir de propriedades geométricas e físicas dos materiais e de cargas móveis) até a análise da influência da interação completa ou parcial entre os elementos da viga mista.

Pelo desenvolvimento desse trabalho pode-se concluir que o dimensionamento de uma viga mista aço-concreto é muito complexo em função de todas as peculiaridades relacionadas aos conectores e aos graus de interação. Ainda, sobre o desenvolvimento tecnológico na área de ferrovias de alta velocidade o Brasil está enormemente deficitado, respaldado unicamente em normas, publicações e tecnologia particular de empresas estrangeiras nessa área.

A partir das análises mostradas pode-se concluir que é possível deixar de utilizar um grande número de conectores em uma viga mista ferroviária causando apenas uma pequena diminuição na resistência ao momento fletor. O grande inconveniente da redução exagerada do número de conectores dessa viga mista é o aumento no deslocamento vertical da linha férrea e conseqüente diminuição do conforto dos passageiros até se alcançar o grau de conforto limite para uma operação ferroviária.

Sendo assim, esse trabalho foi de grande relevância para o aprendizado dos autores sobre esses dois temas não abordados com profundidade no curso de Engenharia de Produção Civil da UTFPR (ferrovias e vigas mistas) e para a consolidação do conhecimento adquirido nas mais diferentes disciplinas do curso em torno de um grande assunto que é a Engenharia.

6 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Como sugestão para próximos trabalhos nesse tema fica proposto o cálculo da mesma viga mista por meio de elementos finitos, de forma a verificar quão conservadores são os cálculos baseados na norma ABNT NBR 8800 (2008) e se os esforços resistentes e os deslocamentos são compatíveis com os cálculos apresentados nesse trabalho.

Ainda, fica-se a sugestão de avaliar financeiramente o caso da redução do número de conectores e eventualmente compará-los com o custo da manutenção do número de conectores e diminuição da seção da viga mista.

REFERÊNCIAS

- ALIAS, Jean. **La Voie Ferrée**. Paris: Éditions Eyrolles/SNCF, 1984.
- ARCELOR MITTAL. **Trilhos ArcelorMittal**, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 7189**: Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias. Rio de Janeiro, 1985.
- _____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de Ferro 2**. Rio de Janeiro: LTC/RFFSA, 1982.
- BORGES NETO, Camilo. **Manual didático de ferrovias**. Universidade Federal do Paraná, 2011.
- CARDOSO, D. C. T. (2006). **Soluções em vigas mistas aço-concreto para o projeto da superestrutura de pontes rodoviárias**. Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CHAVES, I. A. (2009). **Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Ferroviário**. Disponível em <<http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/apresentacao.asp>>. Acesso em: 10 abr. 2013.
- EUROCODE. **EN1990**: Basis of structural design. 2001.

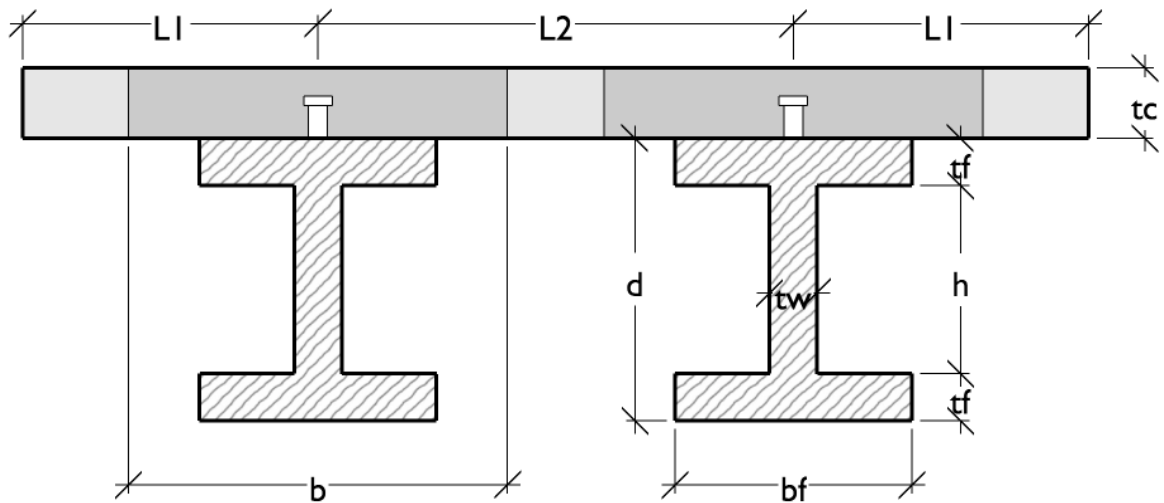
- FONSECA, J. P. G. (2010). **Pontes Ferroviárias Mistas Aço – Betão com Tabuleiro em Viga Contínua**. Lisboa. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- KIRCHHOF, L. D. (2004). **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- KLINSKY, G. E. (1990). **Uma contribuição ao estudo das pontes em vigas mistas**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MALITE, M. (1990). **Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MARTHA, L.F. (2012). Ftool: Um Programa Gráfico-Interativo para Ensino de Comportamento de Estruturas. Versão 3.0. Rio de Janeiro: PUC-RIO, 2012. Disponível em < <http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>>. Acesso em 6 out. 2013.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Disponível em < <http://www.transportes.gov.br/index/conteudo/id/53195>>. Acesso em 6 out. 2013.
- SIEMENS. **High-Speed Trainset Velaro D Datasheet**, 2010. Disponível em <http://www.siemens.com/press/pool/de/events/industry/mobility/2010-04-velaro-d/datasheet_siemens_velaro-d_en.pdf>. Acesso em 17 abr. 2013.
- TRISTÃO, G. A. (2002). **Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER. **UIC 861-3**: Profils unifiés de rails à 60 kg - Types UIC 60 et 60E. Paris, 1969.

- _____. **UIC 505-6**: Règles générales pour les gabarits des véhicules interopérables (sans décharger ni débarquer) en trafic transfrontalier entre les EF de l'UIC et de l'OSJD. Paris, 2006.
- VERÍSSIMO, G. S., OLIVEIRA A.F., VALENTE M.I. e outros (2008). **Avaliação de um conector de cisalhamento para sistemas de piso mistos com pré-laje de concreto**. Santiago. XXXIII Jornadas sudamericanas de ingeniería estructural.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS

- Dados de Entrada:

Comprimento do vão da viga mista biapoiada: $L_t = 30\text{m}$



a. Aço:

Altura total do perfil de aço:	$d = 1675\text{mm}$
Largura das mesas inferior e superior:	$b_f = 1000\text{mm}$
Espessura das mesas inferior e superior:	$t_f = 40\text{mm}$
Espessura da alma:	$t_w = 20\text{mm}$
Altura da alma:	$h = d - 2 \cdot t_f = 1595\text{mm}$

Áreas da Seção:

Área da viga de aço:	$A_a = h \cdot t_w + (2 \cdot b_f \cdot t_f) = 111900 \cdot \text{mm}^2$
Área de uma mesa da seção:	$A_{af} = b_f \cdot t_f = 40000 \cdot \text{mm}^2$
Área da alma da seção:	$A_{aw} = h \cdot t_w = 31900 \cdot \text{mm}^2$

b. Concreto:

Altura da laje de concreto:	$t_c = 20\text{cm}$
-----------------------------	---------------------

Cálculo da largura efetiva da laje (b):

Distância do eixo da viga a extremidade da laje:	$L_1 = 124.65\text{cm}$
--	-------------------------

Distância entre eixos das vigas:	$L_2 = 150.7\text{cm}$
----------------------------------	------------------------

$$b = 2 \cdot \min\left(L_1, \frac{L_2}{2}, \frac{L_t}{8}\right) \quad b = 150.7 \cdot \text{cm}$$

Área efetiva da laje de concreto:	$A_c = (b \cdot t_c) = 3014 \cdot \text{cm}^2$
-----------------------------------	--

Área real da laje de concreto:	$A_{c.\text{real}} = (L_1 + L_2 + L_1) \cdot t_c = 8000 \cdot \text{cm}^2$
--------------------------------	--

c. Conectores tipo pino com cabeça:

Diâmetro dos conectores: $d_1 = 19\text{mm}$

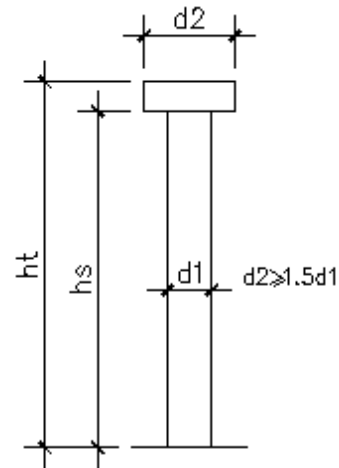
$$d_2 = 32\text{mm}$$

Altura dos conectores: $h_t = 120\text{mm}$

$$h_s = 110.5\text{mm}$$

Seção transversal do conector:

$$A_{sc} = \frac{(\pi \cdot d_1^2)}{4} = 283.53 \cdot \text{mm}^2$$



- Materiais:

a. Aço - ASTM A588:

Resistência do aço:

$$f_y = 345\text{MPa}$$

$$\gamma_{a1} = 1.1$$

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{a1}} = 313.64 \cdot \text{MPa}$$

Módulo de elasticidade do aço:

$$E = 200\text{GPa}$$

Massa específica do aço:

$$\rho_a = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

b. Concreto:

Resistência do concreto:

$$f_{ck} = 30\text{MPa}$$

$$\gamma_c = 1.4$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 21.43 \cdot \text{MPa}$$

Módulo de elasticidade do concreto:

$$E_c = 5600 \cdot 0.85 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} \text{MPa}$$

$$E_c = 26.07 \cdot \text{GPa}$$

Massa específica do concreto:

$$\rho_c = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

c. Conectores tipo pino com cabeça - ASTM 108 Grau 1020:

Resistência a ruptura do aço do conector:

$$f_{ucs} = 415\text{MPa}$$

- Carregamentos Permanentes

Peso Próprio dos Perfis de Aço

Área do perfil de aço: $A_a = 1119 \cdot \text{cm}^2$

Massa específica do aço: $\rho_a = 7850 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Carga distribuída: $q_{\text{aço}} = (2A_a) \cdot g \cdot \rho_a = 17.23 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Peso Próprio da Laje de concreto

Área da laje de concreto: $A_{\text{c.real}} = 8000 \cdot \text{cm}^2$

Massa específica do concreto: $\rho_c = 2500 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Carga distribuída: $q_{\text{conc}} = A_{\text{c.real}} \cdot g \cdot \rho_c = 19.61 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Peso Próprio dos trilhos

Carga distribuída: $q_{\text{trilho}} = 2 \cdot g \cdot 60.34 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 1.18 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

- Cargas Móveis

Coeficiente de impacto - efeito dinâmico

$$\varphi = \begin{cases} 0.001 \cdot \left(1600 - 60 \cdot \sqrt{\frac{L_t}{\text{m}}} + 2.25 \cdot \frac{L_t}{\text{m}} \right) & \text{if } 0.001 \cdot \left(1600 - 60 \cdot \sqrt{\frac{L_t}{\text{m}}} + 2.25 \cdot \frac{L_t}{\text{m}} \right) > 1.2 \\ 1.2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\varphi = 1.34$$

Momento fletor resultante do trem: $M_{\text{Sk.trem}} = 3843 \text{kN} \cdot \text{m}$

Força cortante resultante do trem: $V_{\text{Sk.trem}} = 607.8 \text{kN}$

- Combinação de ações

Aço: $\gamma_{g,\text{aço}} = 1.25$

Concreto: $\gamma_{g,\text{conc}} = 1.35$

Trem: $\gamma_{q,\text{trem}} = 1.2$

Concreto:

$$M_{\text{Sk.conc}} = \frac{q_{\text{conc}} \cdot L_t^2}{8} = 2206.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\text{Sk.conc}} = \frac{q_{\text{conc}} \cdot L_t}{2} = 294.2 \cdot \text{kN}$$

Aço (viga):

$$M_{\text{Sk.aço}} = \frac{q_{\text{aço}} \cdot L_t^2}{8} = 1938.22 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\text{Sk.aço}} = \frac{q_{\text{aço}} \cdot L_t}{2} = 258.43 \cdot \text{kN}$$

Trilho:

$$M_{\text{Sk.trilho}} = \frac{q_{\text{trilho}} \cdot L_t^2}{8} = 133.14 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\text{Sk.trilho}} = \frac{q_{\text{trilho}} \cdot L_t}{2} = 17.75 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Sd.total} = \gamma_{g.aço} \cdot M_{Sk.aço} + \gamma_{g.conc} \cdot M_{Sk.conc} + \gamma_{g.aço} \cdot M_{Sk.trilho} + \varphi \cdot \gamma_{q.trem} \cdot M_{Sk.trem} = 11742.29 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{Sd.total} = \gamma_{g.aço} \cdot V_{Sk.aço} + \gamma_{g.conc} \cdot V_{Sk.conc} + \gamma_{g.aço} \cdot V_{Sk.trilho} + \varphi \cdot \gamma_{q.trem} \cdot V_{Sk.trem} = 1718.91 \cdot \text{kN}$$

Momento Fletor Solicitante de Cálculo para uma viga de aço: $M_{Sd} = \frac{M_{Sd.total}}{2} = 5871.14 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Esforço Cortante Solicitante de Cálculo para uma viga de aço: $V_{Sd} = \frac{V_{Sd.total}}{2} = 859.46 \cdot \text{kN}$

- Classificação do Perfil quanto a esbeltez:

$$\text{Seção} = \begin{cases} \text{"Compacta"} & \text{if } \left(\frac{h}{t_w} \right) \leq 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"Semicompacta"} & \text{if } \left(3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \leq \left(\frac{h}{t_w} \right) \leq \left(5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \\ \text{"Rever o perfil adotado"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Seção} = \text{"Compacta"}$$

- Características Geométricas da Seção de aço:

CG da viga de aço:

$$\text{Superior: } y_s = \frac{\left[b_f \cdot t_f \cdot \left(\frac{t_f}{2} \right) \right] + \left[h \cdot t_w \cdot \left(t_f + \frac{h}{2} \right) \right] + \left[b_f \cdot t_f \cdot \left(t_f + h + \frac{t_f}{2} \right) \right]}{A_a} \quad y_s = 837.5 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Inferior: } y_i = d - y_s \quad y_i = 837.5 \cdot \text{mm}$$

Momento de Inércia da viga de aço em relação ao eixo x:

$$I_{a.x} = \left[\frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot \left(y_s - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right] + \left[\frac{t_w \cdot h^3}{12} + h \cdot t_w \cdot \left[y_s - \left(t_f + \frac{h}{2} \right) \right]^2 \right] + \left[\frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot \left(y_i - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_{a.x} = 6023803.31 \cdot \text{cm}^4$$

Módulo de Resistência elástico inferior do perfil de aço:

$$W_a = \frac{I_{a.x}}{y_i} = 71926.01 \cdot \text{cm}^3$$

Cálculo do CG da viga mista para efeitos de longa duração:

$$\text{Razão modular: } \alpha_E = \frac{3E}{E_c} = 23.01$$

$$\text{Superior: } y_{vm,i} = \frac{A_a \cdot y_i + \left(\frac{b}{\alpha_E} \right) \cdot t_c \cdot \left(d + \frac{t_c}{2} \right)}{A_a + \left(\frac{b}{\alpha_E} \right) \cdot t_c} \quad y_{vm,i} = 935.73 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Inferior: } y_{vm,s} = \left(d + t_c \right) - y_{vm,i} \quad y_{vm,s} = 939.27 \cdot \text{mm}$$

Momento de inércia da viga mista em relação ao eixo x para efeitos de longa duração:

$$I_{tr,x} = I_{a,x} + A_a \cdot (y_{vm,i} - y_i)^2 + \left[\frac{\left(\frac{b}{\alpha_E} \right) \cdot t_c^3}{12} \right] + \left(\frac{b}{\alpha_E} \right) \cdot t_c \cdot \left[d + \left(\frac{t_c}{2} \right) - y_{vm,i} \right]^2 = 7058635.43 \cdot \text{cm}^4$$

Módulo de Resistência elástico:

$$\text{Superior: } W_{tr,i} = \frac{I_{tr,x}}{y_{vm,i}} = 75434.74 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{Inferior: } W_{tr,s} = \frac{I_{tr,x}}{y_{vm,s}} = 75150.02 \cdot \text{cm}^3$$

- Esforços nos Conectores

Coefficiente de ponderação da resistência do conector:

$$\gamma_{cs} = 1.25$$

$$Q_{Rd1} = \frac{(0.5 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c})}{\gamma_{cs}} = 100.3 \cdot \text{kN}$$

$$Q_{Rd2} = \frac{(A_{sc} \cdot f_{ucs})}{\gamma_{cs}} = 94.13 \cdot \text{kN}$$

Força resistente de cálculo individual dos conectores de cisalhamento:

$$Q_{Rd} = \min(Q_{Rd1}, Q_{Rd2}) = 94.13 \cdot \text{kN}$$

Força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje:

$$F_{hd} = \min(A_a \cdot f_{yd}, 0.85 \cdot f_{cd} \cdot A_c)$$

- Grau de interação pretendido:

Grau de Interação: $\eta_i = 100\%$

$$\text{Número de conectores necessário: } n_c = \frac{\eta_i \cdot F_{hd}}{Q_{Rd}} = 58.32$$

- Grau de interação obtido:

Número de conectores adotados para a região entre a seção de maior momento solicitante positivo e a seção de momento solicitante nulo (meia viga):

$$n_a = 59$$

$$\eta_{real} = \begin{cases} n_a \cdot \frac{Q_{Rd}}{F_{hd}} & \text{if } n_a \cdot \frac{Q_{Rd}}{F_{hd}} < 100\% \\ 100\% & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\eta_{real} = 100\%$$

- Resistência total dos conectores:

$$\Sigma Q_{Rd} = n_a \cdot Q_{Rd} = 5553.76 \cdot \text{kN}$$

- Módulo de resistência elástico efetivo:

$$W_{ef} = W_a + \sqrt{\frac{\Sigma Q_{Rd}}{F_{hd}}} \cdot (W_{tr,i} - W_a) = 75455.13 \cdot \text{cm}^3$$

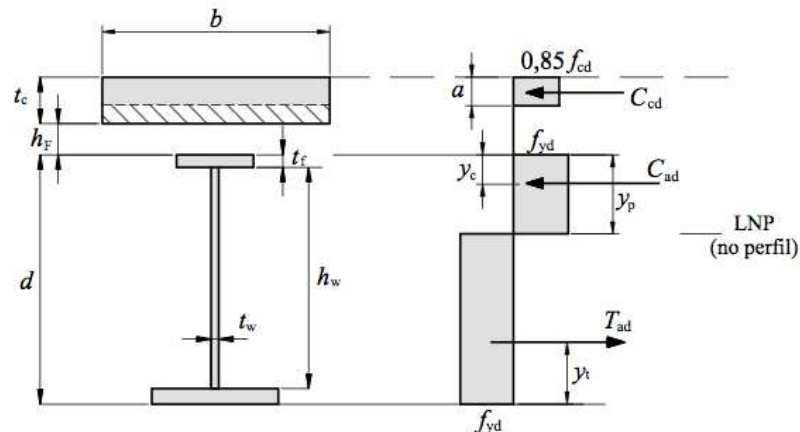
- Espaçamento entre conectores:

Espaçamento obtido:
$$e_{\text{real}} = \frac{L_t}{2n_a} = 25.42 \cdot \text{cm}$$

Espaçamento longitudinal mínimo:
$$e_{\text{min}} = 6 \cdot d_1 = 11.4 \cdot \text{cm}$$

Espaçamento longitudinal máximo:
$$e_{\text{max}} = \min(915 \text{mm}, 8 \cdot t_c) = 91.5 \cdot \text{cm}$$

- Cálculo do momento fletor admissível



- Tipo de interação:

$$\text{Interação} = \begin{cases} \text{"completa"} & \text{if } \Sigma Q_{Rd} \geq F_{hd} \\ \text{"parcial"} & \text{if } \Sigma Q_{Rd} < F_{hd} \end{cases} \quad \text{Interação} = \text{"completa"}$$

- Força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto:

$$C_{cd} = \begin{cases} 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c & \text{if Interação} = \text{"completa"} \\ \Sigma Q_{Rd} & \text{if Interação} = \text{"parcial"} \end{cases} \quad C_{cd} = 5489.79 \cdot \text{kN}$$

- Força resistente de cálculo na região comprimida do perfil de aço:

$$C_{ad} = 0.5 \cdot (A_a \cdot f_{yd} - C_{cd}) = 14803.06 \cdot \text{kN}$$

- Força resistente de cálculo na região tracionada do perfil de aço:

$$T_{ad} = C_{ad} + C_{cd} = 20292.85 \cdot \text{kN}$$

- Altura considerada efetiva da região comprimida:

$$a = \frac{C_{cd}}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b} = 20 \cdot \text{cm}$$

- Localização da Linha Neutra Plástica:

$$\text{LNP} = \begin{cases} \text{"na mesa superior"} & \text{if } C_{ad} \leq A_{af} \cdot f_{yd} \\ \text{"na alma"} & \text{if } C_{ad} > A_{af} \cdot f_{yd} \end{cases} \quad \text{LNP} = \text{"na alma"}$$

$$y_p = \begin{cases} \frac{C_{ad} \cdot t_f}{A_{af} \cdot f_{yd}} & \text{if LNP} = \text{"na mesa superior"} \\ t_f + h \cdot \left(\frac{C_{ad} - A_{af} \cdot f_{yd}}{A_{aw} \cdot f_{yd}} \right) & \text{if LNP} = \text{"na alma"} \end{cases}$$

$$y_p = 399.91 \cdot \text{mm}$$

(A partir do topo do perfil de aço para baixo)

- Pontos de aplicação de esforços de compressão e de tração:

$$y_c = \begin{cases} \frac{y_p}{2} & \text{if LNP = "na mesa superior"} \\ \frac{b_f \cdot t_f \cdot \frac{t_f}{2} + [(y_p - t_f) \cdot t_w] \cdot \left[t_f + \frac{(y_p - t_f)}{2} \right]}{(b_f \cdot t_f) + [(y_p - t_f) \cdot t_w]} & \text{if LNP = "na alma"} \end{cases} \quad y_c = 50.49 \cdot \text{mm}$$

$$y_t = \begin{cases} \frac{b_f \cdot t_f \cdot \frac{t_f}{2} + (h \cdot t_w) \cdot \left(t_f + \frac{h}{2} \right) + [(t_f - y_p) \cdot b_f] \cdot [t_f + h + (t_f - y_p)]}{b_f \cdot t_f + t_w \cdot h + b_f \cdot (t_f - y_p)} & \text{if LNP = "na mesa superior"} \\ \frac{b_f \cdot t_f \cdot \frac{t_f}{2} + [(d - y_p - t_f) \cdot t_w] \cdot \left[t_f + \frac{(d - y_p - t_f)}{2} \right]}{(b_f \cdot t_f) + [(d - y_p - t_f) \cdot t_w]} & \text{if LNP = "na alma"} \end{cases} \quad y_t = 263.4 \cdot \text{mm}$$

- Momento Fletor Resistente de Cálculo:

$$M_{Rd} = \begin{cases} C_{ad} \cdot (d - y_t - y_c) + C_{cd} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + d - y_t \right) & \text{if Interação = "completa"} \\ C_{ad} \cdot (d - y_t - y_c) + C_{cd} \cdot \left(t_c - \frac{a}{2} - y_t + d \right) & \text{if Interação = "parcial"} \end{cases} \quad M_{Rd} = 28446.84 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Cálculo do esforço cortante admissível:

Espaçamento entre enrijecedores transversais: $e_t = L_t = 30 \text{ m}$

$$k_v = \begin{cases} 5 & \text{if } \frac{e_t}{h} > 3 \vee \frac{e_t}{h} > \left(\frac{260}{\frac{h}{t_w}} \right)^2 \\ 5 + \frac{5}{\left(\frac{e_t}{h} \right)^2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_v = 5$$

Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas e semicompactas:

$$\lambda_p = 1.1 \cdot \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} = 59.22 \quad \lambda_r = 1.37 \cdot \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} = 73.76$$

$$\text{Índice de esbeltez: } \lambda = \frac{h}{t_w} = 79.75$$

Esforço Cortante Resistente de Cálculo:

$$V_{Rd} = \begin{cases} \frac{0.6 \cdot A_{aw} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} & \text{if } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{\lambda_p \cdot 0.6 \cdot A_{aw} \cdot f_y}{\lambda \cdot \gamma_{a1}} & \text{if } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ \frac{1.24 \lambda_p^2 \cdot 0.6 \cdot A_{aw} \cdot f_y}{\lambda^2 \cdot \gamma_{a1}} & \text{if } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad V_{Rd} = 4104.83 \cdot \text{kN}$$

- Deslocamento Vertical:

Momento de inércia efetivo da viga mista:

$$I_{ef,x} = I_{a,x} + \sqrt{\frac{\Sigma Q_{Rd}}{F_{hd}}} \cdot (I_{tr,x} - I_{a,x}) = 7064647.67 \cdot \text{cm}^4$$

Deslocamento Vertical:

$$\delta_{vm} = \frac{5 \cdot M_{Sd} \cdot L_t^2}{48 \cdot E \cdot I_{ef,x}} = 38.96 \cdot \text{mm}$$

- Verificações:

- Linha Neutra Plástica está no perfil de aço (e não na laje de concreto):

$$\text{Verificação}_{LNP} = \begin{cases} \text{"Rever o perfil adotado"} & \text{if } \Sigma Q_{Rd} \geq A_a \cdot f_{yd} \wedge 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c \geq A_a \cdot f_{yd} \\ \text{"Ok"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Verificação}_{LNP} = \text{"Ok"}$$

- Momento fletor:

$$M_{Rd} = 28446.84 \text{ m} \cdot \text{kN} \quad M_{Sd} = 5871.14 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

$$\text{Verificação}_1 = \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } M_{Rd} \geq M_{Sd} \\ \text{"Rever o perfil adotado"} & \text{if } M_{Rd} < M_{Sd} \end{cases}$$

$$\text{Verificação}_1 = \text{"Ok"}$$

- Tensão na mesa inferior da viga de aço (somente para seções semicompactas):

Compressão da região superior do concreto

$$\text{Verificação}_2 = \begin{cases} \text{"Não se aplica"} & \text{if } \text{Seção} \neq \text{"Semicompacta"} \\ \text{"OK"} & \text{if } f_{cd} \geq \frac{M_{Sd}}{\alpha_E \cdot W_{tr,s}} \wedge \text{Seção} = \text{"Semicompacta"} \\ \text{"Rever o perfil adotado"} & \text{if } f_{cd} < \frac{M_{Sd}}{\alpha_E \cdot W_{tr,s}} \wedge \text{Seção} = \text{"Semicompacta"} \end{cases}$$

$$\text{Verificação}_2 = \text{"Não se aplica"}$$

Tração da região inferior da viga de aço

Interação Completa

$$\text{Verificação}_3 = \begin{cases} \text{"Não se aplica"} & \text{if } (\text{Interação} \neq \text{"completa"} \vee \text{Seção} \neq \text{"Semicompacta"}) \\ \text{"OK"} & \text{if } f_{yd} \geq \frac{M_{Sd}}{W_{tr,i}} \wedge \text{Interação} = \text{"completa"} \wedge \text{Seção} = \text{"Semicompacta"} \\ \text{"Rever a viga adotada"} & \text{if } f_{yd} < \frac{M_{Sd}}{W_{tr,i}} \wedge \text{Interação} = \text{"completa"} \wedge \text{Seção} = \text{"Semicompacta"} \end{cases}$$

$$\text{Verificação}_3 = \text{"Não se aplica"}$$

Interação Parcial

$$\text{Verificação}_4 = \begin{cases} \text{"Não se aplica"} & \text{if } (\text{Interação} \neq \text{"parcial"} \vee \text{Seção} \neq \text{"Semicompacta"}) \\ \text{"OK"} & \text{if } f_{yd} \geq \frac{M_{Sd}}{W_{ef}} \wedge \text{Interação} = \text{"parcial"} \wedge \text{Seção} = \text{"Semicompacta"} \\ \text{"Rever a viga adotada"} & \text{if } f_{yd} < \frac{M_{Sd}}{W_{ef}} \wedge \text{Interação} = \text{"parcial"} \wedge \text{Seção} = \text{"Semicompacta"} \end{cases}$$

$$\text{Verificação}_4 = \text{"Não se aplica"}$$

- Esforço Cortante:

$$V_{Rd} = 4104.83 \cdot \text{kN} \quad V_{Sd} = 859.46 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Verificação}_5 = \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } V_{Rd} \geq V_{Sd} \\ \text{"Rever o perfil adotado"} & \text{if } V_{Rd} < V_{Sd} \end{cases} \quad \text{Verificação}_5 = \text{"Ok"}$$

- Deslocamentos (grau de conforto para 300 km/h):

$$\delta_{vm} = 38.96 \cdot \text{mm} \quad L_t = 30000 \cdot \text{mm} \quad \frac{L_t}{1500} = 20 \cdot \text{mm} \quad \frac{L_t}{1150} = 26.09 \cdot \text{mm} \quad \frac{L_t}{750} = 40 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Conforto} = \begin{cases} \text{"Muito bom"} & \text{if } \delta_{vm} \leq \frac{L_t}{1500} \\ \text{"Bom"} & \text{if } \frac{L_t}{1500} < \delta_{vm} \leq \frac{L_t}{1150} \\ \text{"Aceitável"} & \text{if } \frac{L_t}{1150} < \delta_{vm} \leq \frac{L_t}{750} \\ \text{"Rever a viga adotada"} & \text{if } \delta_{vm} > \frac{L_t}{750} \end{cases} \quad \text{Conforto} = \text{"Aceitável"}$$

- Espaçamento entre conectores

$$e_{\min} = 11.4 \cdot \text{cm} \quad e_{\text{real}} = 25.42 \cdot \text{cm} \quad e_{\max} = 91.5 \cdot \text{cm}$$

$$\text{Verificação}_6 = \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } e_{\min} \leq e_{\text{real}} \leq e_{\max} \\ \text{"Rever o número de conectores adotado"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Verificação}_6 = \text{"Ok"}$$

- Resumo das Verificações

Seção:	Seção = "Compacta"
Posição LNP:	Verificação _{LNP} = "Ok"
Momento Fletor:	Verificação ₁ = "Ok"
Tensões de compressão:	Verificação ₂ = "Não se aplica"
Tensões de tração:	Verificação ₃ = "Não se aplica"
	Verificação ₄ = "Não se aplica"
Esforço Cortante:	Verificação ₅ = "Ok"
Espaçamento:	Verificação ₆ = "Ok"
Deslocamento:	Conforto = "Aceitável"

$$\eta_{\text{real}} = 100 \cdot \%$$

$$n_a = 59 \quad e_{\text{real}} = 25.42 \cdot \text{cm}$$

$$M_{Rd} = 28446.84 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{Rd} = 4104.83 \cdot \text{kN}$$

$$\delta_{vm} = 38.96 \cdot \text{mm}$$