



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CÂNDIDO ALFREDO CARVALHO DE LUCENA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE MOBILE PARA O DIMENSIONAMENTO
DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO BIAPOIADAS**

João Pessoa - PB
Novembro de 2023

CÂNDIDO ALFREDO CARVALHO DE LUCENA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE MOBILE PARA O DIMENSIONAMENTO
DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO BIAPOIADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes

João Pessoa - PB

Novembro de 2023

F481d Filho, Cândido Alfredo Carvalho de Lucena.

Desenvolvimento de software mobile para o
dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto
biapoiadas / Cândido Alfredo Carvalho de Lucena Filho.
- João Pessoa, 2023.

119 f. : il.

Orientação: Hidelbrando José Farkat Diógenes.
TCC (Graduação) - UFPB/.

1. Estruturas mistas. 2. Viga mista. 3. Aço. 4.
Concreto. 5. Dart. 6. Flutter. I. Diógenes, Hidelbrando
José Farkat. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

CÂNDIDO ALFREDO CARVALHO DE LUCENA FILHO

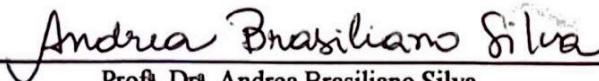
**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE MOBILE PARA O DIMENSIONAMENTO
DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO BIAPOIADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso em 01/11/2023 perante a seguinte Comissão Julgadora:



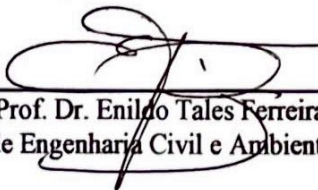
Prof. Dr. Hildebrando Farkat Diógenes
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof.ª. Dr.ª. Andrea Brasiliano Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Dedico este trabalho a meu avô, Solon de Lucena, empreendedor que principiou a tradição de uma família de construtores e, além de um homem de fibra, foi um homem com um grande coração. Esta vitória é nossa, obrigado vovô.

AGRADECIMENTOS

A trajetória até a conclusão do curso de Engenharia Civil foi marcada pela presença de diversas pessoas e instituições pelas quais devo profunda gratidão e gostaria de expressá-la em breves parágrafos.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu avô Solon de Lucena, que foi o meu primeiro familiar a concluir o curso de Engenharia Civil na UFPB, em 1974, e que teve ímpeto e coragem de contribuir com diversas obras de engenharia para a sociedade, além de formar uma família honesta e empreendedora. Meu avô faleceu poucos meses antes do meu resultado do vestibular e ansiava me ver cursando Engenharia Civil.

Agradeço a meus pais, Cândido e Dannielle, por terem me apoiado por toda minha trajetória e por sempre defenderem que eu impusesse todo meu potencial em projetos de diversas naturezas, além de serem minhas referências de caráter e honestidade. Agradeço por me formar como um admirador do conhecimento técnico e prático e formarem uma visão sólida de crescimento pessoal.

Agradeço a meus irmãos pequenos, Bernardo e Lucca, por terem dado tanto amor e carinho para nossa família, eu sou uma pessoa de sorte por tê-los na minha vida. Estendo os agradecimentos a todos meus familiares que me apoiaram durante minhas diversas trajetórias pessoais, acadêmicas e profissionais, em especial a todos meus avós, tios e primos, com forte ênfase a meu tio Dêmison Dutra por ser uma de minhas maiores referências como cidadão e profissional.

Ao professor Hidelbrando, pela contribuição na concepção e base teórica do projeto apresentado, além da orientação de projeto de forma precisa e categórica. O apoio no fim do ciclo de graduação foi fundamental para estabelecer avanços profissionais e mitigar incertezas quanto a futuras etapas da vida.

A todos professores que me acompanharam durante meu curso de graduação, por apoiarem meu crescimento pessoal, técnico e profissional, tendo assim fortalecido minhas habilidades para lidar com os diversos problemas aos quais a vida nos submete. Uma das mais fantásticas experiências com o estudo é olhar para algo complexo e interpretá-lo como óbvio, e a construção dessa interpretação não seria tão eficiente sem professores tão bons.

A todos funcionários da UFPB por manter a operacionalidade da instituição e o acolhimento dos alunos nesse ambiente desafiador, a jornada acadêmica não seria possível sem seu trabalho constante e dedicado.

Aos meus colegas de curso, em especial a Luiz Felipe, José Vinicius, Gabriel Oliveira, Walberg Oliveira, Matheus Marinho, Bruna Oliveira, Rebeca Soares, por todos bons momentos em que pudemos compartilhar conhecimento, viver bons momentos e contar piadas.

Agradeço aos professores Thaís Gaudêncio e Yuri Malheiros, do Centro de Informática da UFPB, e ao professor Telmo Menezes, da Universidade de Bristol, por contribuírem com minha introdução em ambientes acadêmicos e profissionais de programação. Acredito que trabalhar com desenvolvimento de software me tornou um indivíduo mais realizado profissionalmente e reflete boa parte de meus objetivos de carreira a longo prazo.

À TAIL, a Liga Acadêmica de Inteligência Artificial da UFPB, por ter expandido meus horizontes de conhecimento e produção científica, além de abrir caminhos por meio de estágios e projetos na área de programação. Em especial, gostaria de enfatizar meu agradecimento aos seguintes membros da liga que me acompanharam nesses últimos três anos: Manuel Ferreira, Jorge Gomes, Itamar Rocha, Humberto Navarro e Guilherme Jácome. Expresso meus agradecimentos também a todos membros da Liga que pude orientar como diretor nos últimos dois anos, tenho muito orgulho de vocês e desejo muito sucesso na vida e carreira.

Aos meus amigos, por terem me acompanhado e apoiado em situações de diversas naturezas, dentre essas acadêmicas, pessoais e profissionais, sou uma pessoa grata por ter vivido grandes momentos com pessoas fantásticas.

"O homem não pode sobreviver senão por meio da própria mente. Ele entra desarmado no mundo. O próprio cérebro é sua única arma. Os animais obtêm alimentos pela força. O homem não tem garras, não tem presas, não tem chifres, não tem uma grande força muscular. Precisa plantar o próprio alimento, ou caçá-lo. Para plantar, precisa de um processo intelectual. Para caçar, precisa de armas, e, para criar armas, de um processo intelectual. Dessa mais simples necessidade até a mais elevada abstração religiosa, da roda ao arranha-céu, tudo o que somos e tudo o que temos vem de um único atributo do homem. A função de sua mente racional"

Ayn Rand - A Nascente

RESUMO

As vigas mistas de aço e concreto são estruturas que combinam vantagens do concreto e do aço, demonstrando excelente capacidade mecânica e inovação construtiva, o que traz uma crescente demanda para projetistas para um desenvolvimento eficiente dessa solução de engenharia. Nesse estudo, objetivou-se dimensionar vigas mistas de aço e concreto bi-apoiadas através da construção de um *software* na linguagem de programação *Dart*® com o Framework *Flutter*®. O dimensionamento foi feito baseado em parâmetros fixos e variáveis dos materiais, sendo os fixos impostos por normas e variáveis relativos à geometria da seção, resistências características, combinações de carga, dentre outros. Ao final, o resultado do dimensionamento pelo software foi validado e apresentou desempenho adequado como ferramenta de cálculo para a análise de vigas mistas bi-apoiadas.

Palavras-chave: Estruturas mistas; Viga mista; Aço; Concreto; Dart; Flutter

ABSTRACT

Steel and concrete composite beams are structures that combine the advantages of concrete and steel, demonstrating excellent mechanical capacity and constructive innovation, which brings a growing demand for designers to efficiently develop this engineering solution. In this study, the objective was to design simply supported steel and concrete composite beams through the construction of a software in the Dart® programming language with the Flutter® Framework. The design was based on fixed and variable parameters of the materials, the fixed ones being imposed by standards and the variable ones relating to the geometry of the section, material resistances, load combinations, among others. Finally, the result of the software design was validated and presented adequate performance as a calculation tool for the analysis.

Keywords: Composite structures; Composite beam; Steel; Concrete; Dart; Flutter

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Suspended floor, estrutura de Fox & Barret	21
Figura 2 - Ponte ferroviária de Kommerell	22
Figura 3 - Seção transversal de ponte no Lago Lucerna, na Suíça.....	22
Figura 4 - Estruturas mistas de aço e concreto.....	23
Figura 5 - Viga mista de aço e concreto	26
Figura 6 - Laje maciça, laje com fôrma de aço incorporada paralela e ortogonal à viga	28
Figura 7 - Homogeneização de seção com linha neutra elástica no perfil de aço e na laje de concreto.....	30
Figura 8 - Viga biapoiada deformada segundo a teoria da linha elástica.....	32
Figura 9 - Flambagem lateral com torção	43
Figura 10 - Flambagem local da mesa comprimida	45
Figura 11 - Flambagem local da alma	48
Figura 12 - Grau de interação da seção mista e distribuição de tensões	51
Figura 13 - Conectores de pino de cabeça (Stud bolts).....	52
Figura 14 - Conectores de perfil U laminados	52
Figura 15 - Modelagem no STRAP para vigas contínuas	58
Figura 16 - Curva de incêndio padrão	63
Figura 17 - Exemplo de código 01 (Equações 12 e 13 - Grau de interação mínima)	71
Figura 18 - Exemplo de código 02 (Equação 66 - força cortante referente à plastificação da alma por cisalhamento)	71
Figura 19 - Diretórios principais do código-fonte.....	73
Figura 20 - Dependências do aplicativo	73
Figura 21 - Tela inicial	79
Figura 22 - Tela de Dados Geométricos 1	80
Figura 23 - Tela de Dados Geométricos 2.....	80
Figura 24 - Tela de Materiais	81
Figura 25 - Tela de Dados de Temperatura 1	82
Figura 26 - Tela de Dados de Temperatura 2	82
Figura 27 - Tela de Combinações de Carga 1	84
Figura 28 - Tela de Combinações de Carga 2	84
Figura 29 - Tela de conectores	85

Figura 30 - Tela de Relatório 1	87
Figura 31 - Tela de Relatório 2	87
Figura 32 - Tela de Relatório 3	87
Figura 33 - Tela de Relatório 4	87
Figura 34 - Tela de Relatório 5	87
Figura 35 - Tela de Relatório 6	87
Figura 36 - Tela de Relatório 7	88
Figura 37 - Tela de Relatório 8	88
Figura 38 - Tela de Ajuda.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de ponderação de resistências no estado-limite último	25
Tabela 2 - Valores recomendados de parâmetros para aceleração de pico e limites de aceleração	57
Tabela 3 - Fatores de redução do aço	59
Tabela 4 - Fatores de redução da resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local	60
Tabela 5 - Fatores de massividade para situações usuais	62
Tabela 6 - Temperatura na laje de concreto em diferentes faixas de espessura	63
Tabela 7 - Exemplo de cálculo 1	74
Tabela 8 - Resultados de parâmetros geométricos da viga isolada	91
Tabela 9 - Resultados de tipo de análise da viga mista	92
Tabela 10 - Resultados de capacidade resistente em interação completa	92
Tabela 11 - Resultados de capacidade resistente em interação parcial	93
Tabela 12 - Resultados de homogeneização da seção mista	93
Tabela 13 - Resultados de verificação ao esforço cortante	94
Tabela 14 - Resultados de estados-limite da viga de aço isolada	94
Tabela 15 - Resultados para limitação de tensões nas fibras inferiores	95
Tabela 16 - Resultados para deslocamentos	95
Tabela 17 - Resultados para vibração da estrutura	95
Tabela 18 - Resultados para fatores de massividade	95
Tabela 19 - Resultados para temperaturas em situação de incêndio	96
Tabela 20 - Resultados para fatores de redução em análise de incêndio	96
Tabela 21 - Resultados para capacidade resistente em análise de incêndio com interação completa	97

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	16
1.3	OBJETIVO	17
1.4	MÉTODO GERAL DE PESQUISA	18
1.4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.4.2	DESENVOLVIMENTO DOS PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO	18
1.5	ESTRUTURA DO TCC	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO	21
2.1.1	DEFINIÇÃO	21
2.1.2	GENERALIDADES DO AÇO	23
2.1.3	GENERALIDADES DO CONCRETO	24
2.1.4	COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO DE RESISTÊNCIAS NO ESTADO-LIMITE ÚLTIMO	25
2.2	VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO	26
2.2.1	DEFINIÇÃO E GENERALIDADES	26
2.2.2	DISPOSIÇÕES SOBRE A LAJE DE CONCRETO	28
2.2.3	HOMOGENEIZAÇÃO DA SEÇÃO MISTA	29
2.2.4	DESLOCAMENTOS	32
2.2.5	VERIFICAÇÃO AO MOMENTO FLETOR	33
2.2.5.1	LARGURA EFETIVA DA MESA DE CONCRETO	33
2.2.5.2	GRAU DE INTERAÇÃO DA VIGA MISTA	34
2.2.5.3	MOMENTO FLETOR RESISTENTE DE VIGA MISTA DE ALMA CHEIA EM REGIÕES DE MOMENTO POSITIVO	35
2.2.5.3.1	CONSTRUÇÃO ESCORADA	36
2.2.5.3.1.1	ANÁLISE PLÁSTICA DE VIGAS MISTAS	36
2.2.5.3.1.2	ANÁLISE ELÁSTICA DE VIGAS MISTAS	40
2.2.5.3.2	CONSTRUÇÃO NÃO-ESCORADA	41
2.3	ANÁLISE DE VIGA DE AÇO ISOLADA	42
2.3.1	FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO	43
2.3.2	FLAMBAGEM LOCAL DA MESA COMPRIMIDA	45
2.3.3	FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA	47

2.4 VERIFICAÇÃO AO ESFORÇO CORTANTE	49
2.5 CONECTORES DE CISALHAMENTO	50
2.5.1 DEFINIÇÃO E GENERALIDADES	51
2.5.2 FORÇA RESISTENTE DE CÁLCULO	53
2.5.2.1 PINOS COM CABEÇA (STUD BOLTS)	53
2.5.2.2 PERFIL U LAMINADO OU FORMADO A FRIO	54
2.6 VIBRAÇÕES.....	55
2.7 ANÁLISE EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	58
2.7.1 DEFINIÇÃO E GENERALIDADES	58
2.7.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	58
2.7.3 FATOR DE MASSIVIDADE	61
2.7.4 INCÊNDIO-PADRÃO.....	62
2.7.5 TEMPERATURA NA LAJE DE CONCRETO	63
2.7.6 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO PERFIL DE AÇO	65
2.7.6.1 SEM PROTEÇÃO CONTRA FOGO	65
2.7.6.2 COM MATERIAL DE REVESTIMENTO CONTRA FOGO TIPO CAIXA.....	67
2.7.7 CAPACIDADES RESISTENTES	68
2.7.7.1 MOMENTO FLETOR RESISTENTE DE CÁLCULO.....	68
2.7.7.2 CONECTORES DE CISALHAMENTO.....	68
2.7.7.3 FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO.....	69
3 SOBRE O APLICATIVO.....	70
3.1 DESENVOLVIMENTO HÍBRIDO COM FLUTTER E DART	70
3.2 VMB Studio® 1.0.....	70
3.2.1 ROTINAS DE CÁLCULO.....	70
3.2.2 FONTES EXTERNAS DE DADOS	71
3.2.3 ESTRUTURA DE DIRETÓRIOS E DEPENDÊNCIAS	72
3.2.4 EXEMPLOS DE CÁLCULO	74
3.2.5 VERIFICAÇÃO DE RESULTADOS	75
4 RESULTADOS.....	78
4.1 MANUAL DO USUÁRIO.....	78
4.2 VALIDAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO PARA EXEMPLO 1.....	90
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
7 APÊNDICES.....	103

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As vigas mistas de aço e concreto são estruturas formadas a partir de um perfil de aço associado a uma laje de concreto em sua face superior, tendo ligação mecânica estabelecida por conectores de cisalhamento entre esses componentes para combater a flexão. Essa configuração estrutural é adequada a diversas soluções de engenharia como obras de edificações residenciais, centros comerciais e pontes rodoviárias, resultante de sua performance estrutural elevada e vantagem econômica quando comparadas a vigas de aço isoladas.

A performance desse tipo de estrutura reflete a sua excelente capacidade de resistência mecânica, combate à flexão e durabilidade, resultantes da associação de diferentes materiais em sua composição. Essa associação torna o dimensionamento estrutural dessas vigas em uma análise tecnologicamente mais refinada, tendo considerações sobre homogeneização de seção transversal, resistência à flexão, escoramento da construção, dentre outras.

Essa tipologia estrutural, concebida no final do século XIX, tornou a ganhar relevância industrial a partir da década de 1960, por razão do refinamento tecnológico na projeção e construção de sistemas mistos aço-concreto (FONSECA, 2015). Entretanto, no Brasil, até a década de 1970, ainda não existiam normas técnicas para o desenvolvimento de estruturas mistas (FAKURY, 2007), o que tornava necessário utilizar regulações estrangeiras para tal finalidade. A primeira norma brasileira de desenvolvimento de estruturas mistas de aço e concreto foi publicada em 1986 sob título de ABNT NBR 8800, cuja edição mais recente é a ABNT NBR 8800:2008.

Neste trabalho, objetivou-se desenvolver um software mobile para dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto, com a finalidade de verificação de parâmetros resistentes e de interação das vigas, no intuito de orientar o operador do software quanto ao detalhamento e execução de uma estrutura dessa natureza.

1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

O sequenciamento lógico para dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto requer muitos cálculos, que demandam análises acuradas de condições geométricas, propriedades dos materiais empregados, combinações de cargas, além de outras formulações

necessárias para verificação estrutural. Empregar esforço manual é uma alternativa menos prática para a resolução desses cálculos, pois projetos de engenharia modernos requerem desenvolvimento ágil de soluções e muitas rotinas lógicas podem ser atribuídas a uma máquina computacional.

O desenvolvimento de software é uma atividade essencial em diversos campos do conhecimento cujas descobertas pautam-se em rotinas lógicas, dentre essas áreas vale citar a Engenharia Civil, que requer uma cuidadosa análise a partir de diversos parâmetros de cálculo para o dimensionamento de estruturas. Para um desenvolvimento efetivo dessas considerações matemáticas, o Framework *Flutter*® aliado à linguagem de programação *Dart*® são ferramentas ideais para adoção, ao permitirem a produção de aplicações híbridas com apenas um código-fonte. Essas duas tecnologias, quando integradas, permitem a construção de interfaces gráficas em aparelhos celulares e foram concebidas pela Google® com o intuito de criar aplicativos em tempo recorde, além de que o *Dart*® se assemelha a diversas outras linguagens de programação consolidadas no mercado (como o JavaScript® e o Python®).

É verificável uma carência quanto ao desenvolvimento de rotinas computacionais de cálculo para vigas mistas no Brasil, poucos softwares apresentam suporte para dimensionamentos automatizados desse tipo de estrutura, o que acarreta em atrasos no progresso tecnológico para a adoção dessa solução no País.

A análise por meio de rotinas de cálculo agrega diversos parâmetros constitutivos da estrutura a se analisar e promove resultados inerentes às verificações necessárias para a viga mista de aço e concreto. O resultado dessas operações reflete a capacidade funcional e estética da estrutura, cujas verificações serão abordadas com maior detalhamento ao longo deste trabalho e incluem situações de escoramento, solicitações de esforços, deslocamentos, dentre outras.

1.3 OBJETIVO

O atual estudo objetiva detalhar o desenvolvimento de um software mobile com fins didáticos para dimensionamento de vigas mistas biapoiadas, destinado a estudantes e profissionais da área de engenharia. Dentre os objetivos específicos deste estudo, estão:

- Desenvolvimento de um software para aparelhos móveis de dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto;

- Analisar a estrutura segundo condições de não escoramento;
- Projetar os diagramas de esforços solicitantes de momento fletor e esforço cortante;
- Calcular a deflexão da viga mista a partir do método da linha elástica;
- Calcular a frequência natural da viga mista;
- Analisar a estrutura em situação de incêndio;
- Promover maior visibilidade a estruturas mistas de aço e concreto enquanto solução tecnológica para a construção civil

1.4 MÉTODO GERAL DE PESQUISA

Essa seção do estudo apresentará a metodologia para a articulação desse trabalho, cujo objetivo principal pauta-se na automação de cálculos de dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto.

1.4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica foi estruturada em grande parte pelas normas ABNT NBR 8800:2008, ABNT NBR 14323:2013, ABNT NBR 5628:2022 e ABNT NBR 15200:2004, além de materiais de estudo de FRUCHTENGARTEN (2010) e PAULA JUNIOR (2016), outras referências nas quais fundamentou-se o estudo são citadas na seção de referências bibliográficas.

A partir dessas fontes de informações técnicas, fundamentou-se uma precisão mais acurada de dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto, por fim de desenvolvimento da estrutura lógica de programação em *Flutter®* e *Dart®*.

1.4.2 DESENVOLVIMENTO DOS PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO

A estruturação dos procedimentos de cálculo fundamentou-se nas orientações técnicas da seção 2, tendo referência matemática a partir de características geométricas, de materiais, de combinações de cargas, dentre outras considerações elencadas sobre os problemas escolhidos para análise. Em termos de arquitetura de código, adotou-se a Programação Orientada a Objetos para estruturação das classes e funções no código-fonte para automação das rotinas necessárias.

1.4.3 DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO E RESULTADOS

Desenvolveu-se o software (VMB Studio®) a fim de aplicar o procedimento lógico de análise de vigas mistas de aço e concreto, e, com isso, atingir os objetivos propostos neste estudo; dessa forma, para a construção de um código de alta eficiência, adotou-se a linguagem de programação *Dart*® com o Framework *Flutter*®. As ferramentas de programação e a estrutura do aplicativo serão exploradas em mais detalhes no capítulo 3.

Foi necessária a verificação e testagem do programa antes da aplicação do software para dimensionamento estrutural. Esse processo de validação foi realizado por meio de programas de cálculo estrutural comerciais e acadêmicos de vigas mistas de aço e concreto e também através de cálculos manuais, essas especificações são detalhadas no capítulo 3.

1.4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS

Foi necessária a verificação e testagem do programa antes da aplicação do software para dimensionamento estrutural. Esse processo de validação foi realizado por meio de fontes de cálculo estrutural comerciais e acadêmicas de vigas mistas de aço e concreto e também através de verificação analítica, os resultados relativos a essa comparação são especificados no capítulo 4.

1.5 ESTRUTURA DO TCC

A estruturação geral do TCC está articulada nas seguintes considerações:

- **Capítulo 2:** Apresentará a fundamentação teórica do estudo e rotinas de cálculo normatizadas para dimensionamento da estrutura;
- **Capítulo 3:** Apresentará uma introdução às tecnologias utilizadas no Software, o desenvolvimento estrutural do aplicativo, além do estabelecimento dos critérios de análise comparativa com outras fontes de dimensionamento de vigas mistas;

- **Capítulo 4:** Apresentará o resultado da produção do software em manual de utilização, assim como resultado de análise comparativa de exemplo de cálculo;
- **Capítulo 5:** Considerações finais sobre a pesquisa

2 REFERENCIAL TEÓRICO

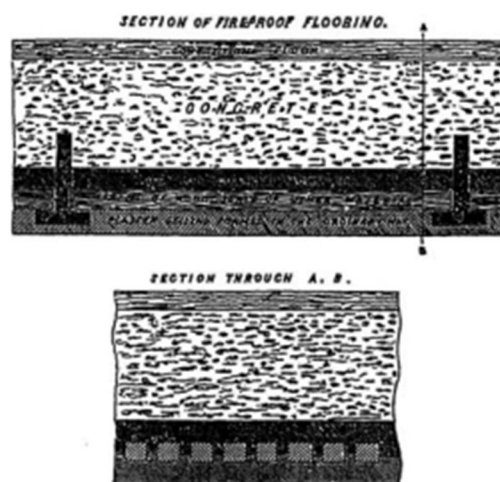
2.1 ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

2.1.1 DEFINIÇÃO

As estruturas mistas de aço e concreto são parte de uma tipologia estrutural desenvolvida pela associação parcial ou completa desses dois materiais, visando uma combinação em que um componente compensa desvantagens do outro, o que resulta em melhorias de ordem financeira, estética e executiva. Dentre exemplos de estruturas pertencentes a esse grupo, pode-se citar pilares, vigas e lajes mistas, cada qual com suas particularidades de dimensionamento e execução.

Segundo Pelke & Kurrer, o histórico de desenvolvimento das estruturas mistas de aço e concreto começa com a patente de Ralph Dood, em 1808, de uma estrutura denominada *suspended floors*, composta por barras de ferro maleável com argamassa. Em seguida, outros cientistas adotaram o uso de concreto e aço em versões aprimoradas desse tipo de estrutura, dentre esses, em destaque, estão Fox e Barret, que em 1851 desenvolveram um sistema misto de aço e concreto para lajes.

Figura 1 - Suspended floor, estrutura de Fox & Barret

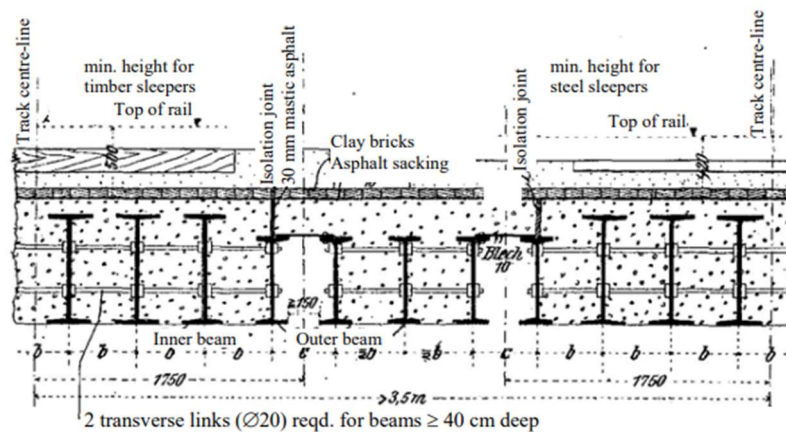


Fonte: PELKE & KURRER (2015)

No início do século XX, avanços tecnológicos foram testados para desenvolvimento de estruturas mistas com separação dos elementos na seção transversal em fase de construção. Nesse

contexto, obras de construção mais avançadas foram concebidas por engenheiros, como Kommerell, que em 1911 projetou uma ponte ferroviária com um perfil transversal do tabuleiro composto por vigas de aço de perfil I envoltas por concreto, essa estrutura apresentou um elemento de conexão entre os perfis de aço que foi detalhada por Combournac em 1932 como conectores de cisalhamento.

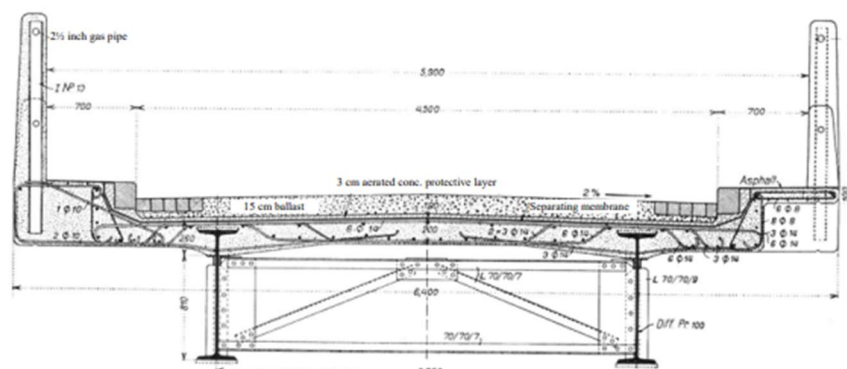
Figura 2 - Ponte ferroviária de Kommerell



Fonte: PELKE & KURRER (2015)

Em seguida, o avanço das tecnologias de estruturas mistas de aço e concreto foi propulsionada na segunda metade do século XX, por estudos mais refinados de engenheiros de diversas localidades, com ênfase na contribuição do desenvolvimento suíço, alemão e estadunidense de métodos construtivos mais eficientes e econômicos, o que proporcionou um mercado de construção mais sólido e expansivo para construções a partir dessa configuração de estrutura.

Figura 3 - Seção transversal de ponte no Lago Lucerna, na Suíça

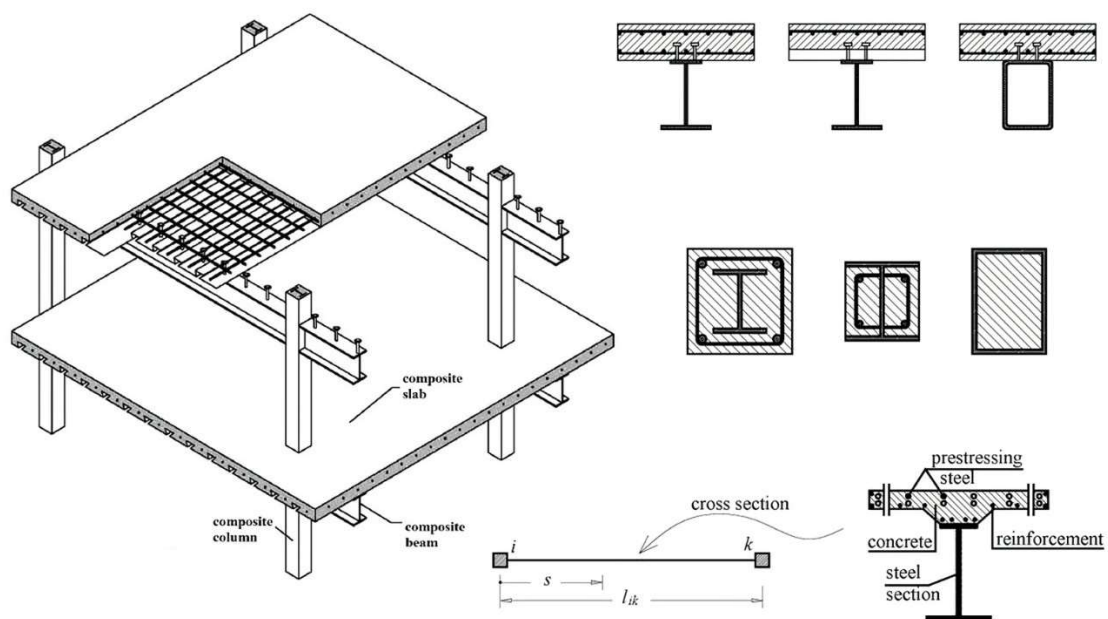


Fonte: PELKE & KURRER (2015)

De forma geral, essas contribuições promoveram uma tipologia estrutural que utiliza a qualidade do concreto na compressão e proteção ao perfil de aço contra corrosão juntamente com o aço, que é eficiente na tração e garante ductibilidade ao concreto. A metodologia de análise estrutural de estruturas mistas considera diversos fatores quanto a propriedades dos materiais adotados, de forma a tomar proveito das qualidades de cada um e tornar os cálculos matemáticos mais precisos.

A norma brasileira que regulamenta o dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto é denominada de ABNT NBR 8800:2008.

Figura 4 - Estruturas mistas de aço e concreto



Fonte: Institute of Numerical Analysis and Design of Structures

2.1.2 GENERALIDADES DO AÇO

O aço é um material essencial para o mercado de construção civil e viabiliza tecnicamente estruturas desafiadoras, ao apresentar bom desempenho mediante deformações de tração e boa ductibilidade, além de sua rapidez de execução. Nas estruturas mistas de aço e concreto, os componentes de aço de seções analisadas provêm benefícios que compensam deficiências do concreto, dentre esses destaca-se o combate a esforços de tração.

A definição de propriedades gerais para a estrutura a ser analisada é fundamental para caracterização do estudo. Segundo a ABNT NBR 8800:2008, as propriedades mecânicas dos aços contidos para análise em estruturas mistas de aço e concreto são, para efeito de cálculo:

- a) Módulo de elasticidade, $E = E_a = 200\,000\text{ MPa}$;
- b) Coeficiente de Poisson, $\nu_a = 0,3$;
- c) Módulo de elasticidade transversal, $G = 77\,000\text{ MPa}$;
- d) Coeficiente de dilatação térmica, $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- e) Massa específica, $\rho_a = 7\,850\text{ kg/m}^3$

2.1.3 GENERALIDADES DO CONCRETO

O concreto é um material essencial para o desenvolvimento de diversas soluções de engenharia estrutural, sendo componente presente em grande parte das obras no mundo. Desenvolvido pela primeira vez na Roma Antiga, o concreto foi alvo de diversos estudos e aprimoramento na história da humanidade, sendo popularizado enquanto recurso construtivo no século XIX a partir do patenteamento do Cimento Portland em 1824 (TUTIKIAN, 2023).

Esse material tem um bom desempenho estrutural no combate a esforços de compressão e proteção contra incêndio, tornando-se uma escolha preferencial em uma ampla gama de aplicações, desde a construção de edifícios e pontes até a pavimentação de estradas e a criação de barragens. Sua versatilidade, durabilidade e capacidade de se adaptar a diferentes formas e tamanhos o tornam um recurso valioso na engenharia civil moderna.

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, as propriedades do concreto de densidade normal seguem as especificações ABNT NBR 6118, tendo uma faixa de valores para resistência característica à compressão f_{ck} entre 20 MPa e 50 MPa. Outras considerações normativas das propriedades do concreto são:

- a) Módulo de elasticidade, como o módulo de deformação tangente inicial, $E_{ci} = 5\,600\sqrt{f_{ck}}$, com E_{ci} e f_{ck} expressos em megapascal (MPa), para verificação da estrutura em data igual ou superior a 28 dias;

- b) Módulo de elasticidade secante, a ser utilizado em análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados-limites de serviço, $E_{cs} = 0,85 E_{ci}$;
- c) Coeficiente de Poisson, $\nu_c = 0,20$;
- d) Coeficiente de dilatação térmica, $\beta_c = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- f) Massa específica, $\rho_c = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ para concreto sem armadura, $\rho_c = 2500 \text{ kg/m}^3$ para concreto armado

Para concreto de baixa densidade, sem armadura, deve-se ter uma massa específica mínima de 1500 kg/m^3 e máxima de 2200 kg/m^3 , o módulo de elasticidade secante, em megapascal, para essa configuração é:

$$E_{cs} = E_c = 40,5 \left(\frac{\rho_c}{100} \right)^{1,5} \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

2.1.4 COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO DE RESISTÊNCIAS NO ESTADO-LIMITE ÚLTIMO

A análise da estrutura mista de aço e concreto considera coeficientes de ponderação de resistências referentes ao aço estrutural, do concreto e do aço das armaduras, denominados, respectivamente, de γ_a , γ_c e γ_s . Estes coeficientes dependem da natureza da combinação última de ações empregada na análise e estão apresentados na Tabela 1, sob a orientação da ABNT NBR 8800:2008.

Tabela 1 - Coeficientes de ponderação de resistências no estado-limite último

Combinações	Aço estrutural γ_a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}		

Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Excepcionais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

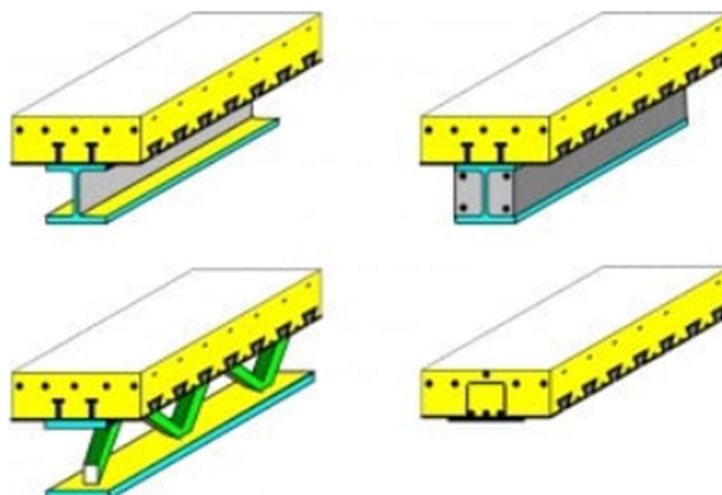
Fonte: ABNT NBR 8800:2008

2.2 VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

2.2.1 DEFINIÇÃO E GENERALIDADES

As vigas mistas de aço e concreto são estruturas compostas pela combinação desses dois materiais de construção, usualmente em forma de um perfil de aço associado a uma faixa de laje imediatamente acima desse. A associação mecânica desses componentes é permitida por meio de conectores de cisalhamento, cuja natureza de associação pode permitir uma associação parcial ou completa entre o aço e concreto, essa ligação é fundamental pois caso essa não exista, admite-se uma análise da viga de aço isolada sem contribuição da laje de concreto.

Figura 5 - Viga mista de aço e concreto



Fonte: PAUL (2014)

A utilização desse tipo de estrutura é fundamentada no combate à flexão ocorrido quando uma faixa da laje de concreto é considerada como parte da seção analisada, as tipologias de laje previstas pela ABNT NBR 8800:2008 são: maciça moldada no local, mista e com pré-laje de concreto pré-moldada.

Segundo essa norma, aplicam-se exigências específicas importantes para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto, dentre essas, são importantes referenciar:

- Em caso de a estrutura de aço da viga mista ser um perfil I, a viga denomina-se viga mista de aço e concreto de alma cheia;
- Na análise de vigas mistas de aço e concreto biapoiadas, o maior valor admitido para a razão entre a altura do perfil de aço e espessura da alma (h/t_w) é $5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$, caso seja maior que esse valor, a viga denomina-se esbelta e um ou mais elementos em compressão flambam em regime elástico. Caso h/t_w seja inferior ou equivalente a $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$, a viga é considerada compacta e é dimensionada sob a análise plástica da seção mista. Caso h/t_w seja maior que $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ e menor ou igual a $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$, a viga é dimensionada segundo a análise elástica da seção mista;
- A interação entre aço e concreto é completa, em regiões de momento positivo, se a resistência de cálculo dos conectores for igual ou superior à resistência de cálculo do componente de aço à tração ou da laje de concreto à compressão, o menor dos dois valores, que será considerado F_{hd} . Caso a resistência de cálculo dos conectores seja inferior aos dois valores, a interação é parcial

Em que:

E - é o módulo de elasticidade longitudinal do aço, definido em 2.1.2, em MPa;

f_y - é a resistência ao escoamento do aço, em MPa

As resistências de cálculo adotadas para o estudo de vigas mistas de aço e concreto são, segundo a ABNT NBR 8800:2008:

- Para o aço dos perfis: $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{a1}}$
- Para o aço da fôrma de aço incorporada: $f_{yFd} = \frac{f_{yF}}{\gamma_{a1}}$
- Para o concreto: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$
- Para o aço das barras de armadura: $f_{sd} = \frac{f_{ys}}{\gamma_c}$

Em que:

f_{yF} - é a resistência ao escoamento do aço da fôrma de aço incorporada;

f_{ck} - é a resistência característica do concreto à compressão;

f_{ys} - é a resistência ao escoamento do aço das barras de armadura;

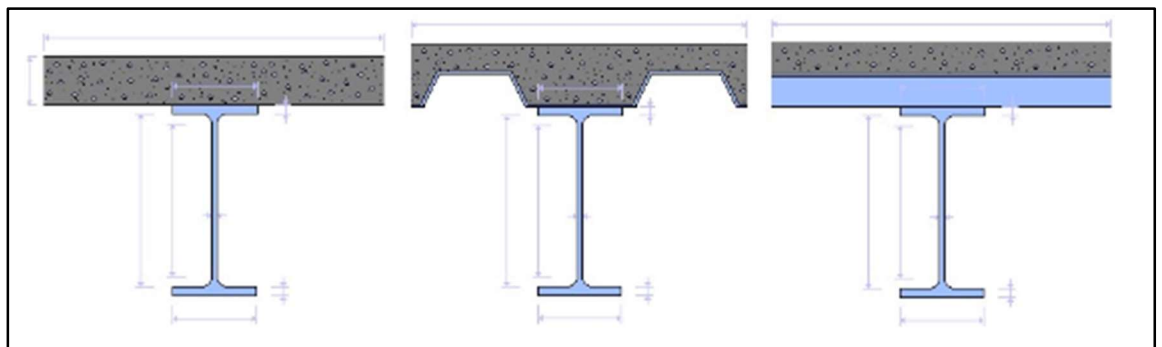
γ_{a1} - é o coeficiente de ponderação de resistência do aço no estado-limite último para escoamento, flambagem e instabilidade, conforme a Tabela 1;

γ_c - é o coeficiente de ponderação de resistência do concreto no estado-limite último, conforme a Tabela 1

2.2.2 DISPOSIÇÕES SOBRE A LAJE DE CONCRETO

A natureza construtiva da laje de concreto a ser considerada na viga mista é de fundamental importância para determinação de propriedades da estrutura mista analisada. Dentre as tipologias de laje a serem estudadas para o dimensionamento da viga mista estão a laje de concreto maciça moldada no local, a laje de concreto com fôrma de aço incorporada com nervuras paralelas e ortogonais à viga.

Figura 6 - Laje maciça, laje com fôrma de aço incorporada paralela e ortogonal à viga



Fonte: Viga Mista 3.0

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, para uma viga mista de aço e concreto com laje de concreto com fôrma de aço incorporada, as seguintes limitações têm que ser adotadas:

- A altura das nervuras h_F da fôrma de aço deve ser menor ou igual a 75 mm;
- A largura média b_F da mísula ou da nervura locada sobre o perfil de aço deve ser de no mínimo 50 mm;
- Projeção dos conectores acima do topo da fôrma, após instalação, de pelo menos 40 mm;
- O cobrimento de concreto acima do topo da fôrma de aço deve ser de no mínimo 50 mm

Para fôrmas com nervuras ortogonais ao perfil de aço, estendem-se as seguintes regras normativas:

- Em rotinas de cálculo para determinação de capacidade resistente da seção, o concreto abaixo do topo da fôrma de aço é desconsiderado;
- As fôrmas de aço devem ser ancoradas no perfil de aço das vigas mistas com intervalos de no máximo 450 mm

Para fôrmas com nervuras paralelas ao perfil de aço, estende-se a seguinte regra normativa:

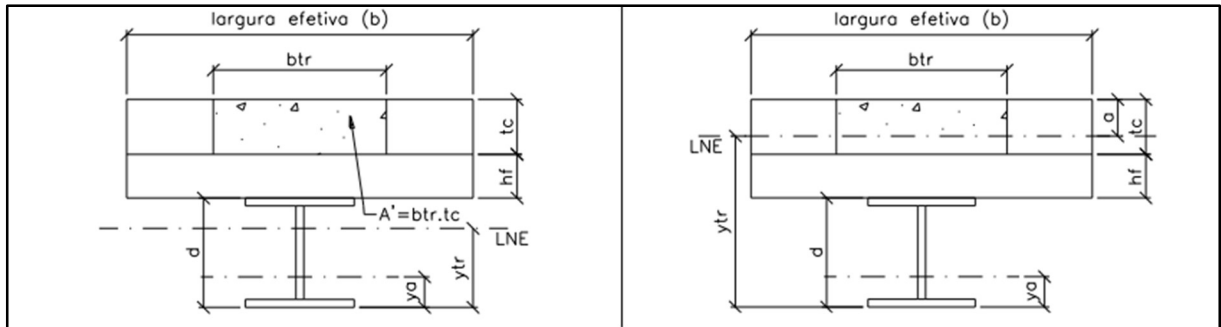
- Em rotinas de cálculo para determinação de capacidade resistente da seção, o concreto abaixo do topo da fôrma de aço pode ser considerado desde que totalmente situado na zona comprimida (para o atual estudo essa contribuição será desconsiderada para fins de segurança)

2.2.3 HOMOGENEIZAÇÃO DA SEÇÃO MISTA

A natureza da viga mista de aço e concreto admite, em certas análises, a homogeneização da seção mista como forma de aferir determinados resultados, dentre esses

estão o cálculo de deslocamentos, momento fletor resistente em análise elástica, limitação de tensões nas fibras inferiores da viga mista, além de outros.

Figura 7 - Homogeneização de seção com linha neutra elástica no perfil de aço e na laje de concreto



Fonte: PAULA JUNIOR (2016)

De maneira geral, a composição geométrica da seção mista é composta por uma faixa de laje de concreto acima de um perfil de aço. Entende-se que, para homogeneizar a composição, deve-se dividir a largura efetiva da laje de concreto pela razão modular $\alpha_E = E/E_c$, sendo E e E_c , respectivamente, os módulos de elasticidade do aço e do concreto. Dessa forma, é possível estudar a distribuição de tensões na seção transversal considerando uma composição homogênea de materiais.

Com uma estrutura homogeneizada, o cálculo para as propriedades geométricas admite uma distribuição de tensões linear. O procedimento de cálculo para caracterização da seção transformada considera a linha neutra elástica (LNE) na viga de aço ou na laje de concreto. O cálculo para a LNE, considerada a partir da face inferior do componente de aço, é computado da seguinte forma:

$$y_{tr,i} = \frac{A_a y_a + A_c' (d + hf + t/2)}{A_a + A_c'} \quad (2)$$

O cálculo do momento de inércia da seção mista homogeneizada tem uma rotina dependente da posição de $y_{tr,i}$, a ser classificada se a LNE perpassa a viga de aço ou a laje de concreto.

- LNE passando pela viga de aço

$$y_{tr} = y_{tr,i} \quad (3)$$

$$I_{tr} = I_a + A_a(y_{tr} - y_a)^2 + \frac{b_{tr} tc^3}{12} + A_c'(d + hf + tc/2 - y_{tr})^2 \quad (4)$$

- LNE passando pela laje de concreto

$$a = \frac{-A_a + \sqrt{A_a^2 + 2b_{tr} A_a (d/2 + hf + t)}}{b_{tr}} \quad (5)$$

$$y_{tr} = (d + hf + tc) - a \quad (6)$$

$$I_{tr} = I_a + A_a(y_{tr} - y_a)^2 + \frac{b_{tr} a^3}{12} + b_{tr} a \left(\frac{a}{2}\right)^2 \quad (7)$$

Em posse dos parâmetros geométricos da seção mista homogeneizada, é possível computar os módulos resistentes elásticos:

$$(W_{tr})_i = I_{tr}/y_{tr} \quad (8)$$

$$(W_{tr})_s = \frac{I_{tr}}{(d + hf + tc) - y_{tr}} \quad (9)$$

Em que:

A_a - é a área do componente de aço da seção mista;

y_a - é a posição da linha neutra do perfil de aço isolado medido a partir da base da mesa inferior;

A_c' - é a área de concreto equivalente na seção homogeneizada;

d - é a altura do perfil de aço;

hf - é a altura das nervuras da fôrma de aço incorporada, caso a laje seja de concreto moldada no local o valor equivale a 0;

tc - é a espessura da laje de concreto;

I_a - é o momento de inércia do eixo de maior inércia do perfil de aço;

b_{tr} - é a largura efetiva da laje de concreto na seção homogeneizada;

b_{tr} - é a largura efetiva da laje de concreto na seção homogeneizada;

$(W_{tr})_i$ - é o módulo de resistência plástico inferior da seção homogeneizada;

$(W_{tr})_s$ - é o módulo de resistência plástico superior da seção homogeneizada

2.2.4 DESLOCAMENTOS

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, o cálculo de deslocamentos na viga mista biapoiada fundamenta-se na consideração de uma análise elástica da seção. O método articulado nesse estudo para análise elástica de deslocamentos é o método da linha elástica, que, para uma estrutura de viga biapoiada (alvo de estudo), fundamenta-se na seguinte relação:

$$v = \frac{q \cdot x(L^3 - 2Lx^2 + x^3)}{24EI} \quad (10)$$

Em que:

q - é a carga por metro linear aplicada na viga;

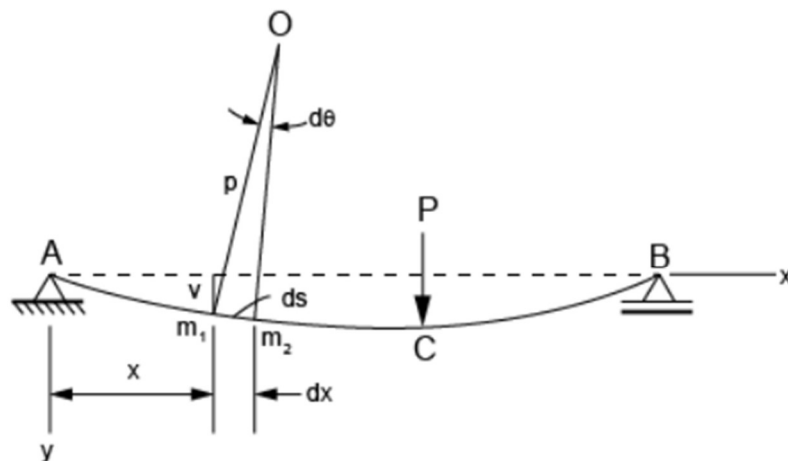
x - é a posição na viga para análise de deflexão;

L - é o comprimento total da viga;

E - é o módulo de elasticidade longitudinal da estrutura;

I - é o momento de inércia da seção.

Figura 8 - Viga biapoiada deformada segundo a teoria da linha elástica



Fonte: LAGES (2017)

O momento de inércia considerado nos cálculos tem um eixo de flexão ortogonal à alma da seção transversal, tendo que ser considerado por orientação normativa, em regiões de momentos positivos, como a seguinte equação:

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}}} (I_{tr} - I_a) \quad (11)$$

Em que:

I_a é o momento de inércia da seção do perfil de aço isolado;

I_{tr} é o momento de inércia da seção mista homogeneizada, conforme 2.2.3;

$\sum Q_{Rd}$ é o somatório das resistências de cálculo dos conectores de cisalhamento;

F_{hd} é definido em 2.2.1

Para situação de construção não escorada, conforme definições de 2.2.5.3.2, afere-se a deflexão para a estrutura sujeita a cargas do peso próprio de viga e laje com o momento de inércia da viga de aço isolada somada à deflexão para a estrutura sujeita a cargas permanentes com o momento de inércia efetivo I_{ef} .

Segundo orientação da ABNT NBR 8800:2008, é possível considerar os efeitos de longa duração (fluência e retração do concreto) na seção homogeneizada por meio da multiplicação da razão modular $\alpha_E = E/E_c$ por 3. As limitações normativas para a flecha máxima para vigas mistas estão contidas no Anexo C da ABNT NBR 8800:2008, que, para a atual análise, será considerada para a viga de piso, cuja deflexão máxima é $L/350$, sendo L o comprimento total do perfil de aço.

2.2.5 VERIFICAÇÃO AO MOMENTO FLETOR

2.2.5.1 LARGURA EFETIVA DA MESA DE CONCRETO

A análise do dimensionamento do momento fletor reflete uma associação de parâmetros geométricos, de materiais e de combinação de cargas. Nesse contexto, deduz-se para uma determinada viga a largura efetiva da laje de concreto para início de

dimensionamento, sendo essa a largura da faixa de laje considerada na combinação entre concreto e aço.

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, o valor da largura efetiva da mesa de concreto é deduzido como o menor dos três resultados entre:

- Um oitavo do vão da viga mista, admitido entre linhas de centro dos 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

O resultado dessa variável reflete na contribuição da laje de concreto ao combate à flexão da viga mista, sendo um maior valor de largura efetiva associado com uma maior resistência mecânica.

2.2.5.2 GRAU DE INTERAÇÃO DA VIGA MISTA

O grau de interação é um parâmetro que define a parcela da contribuição da faixa de concreto da viga mista que será considerada no combate à flexão. Essa relação é denotada, segundo a ABNT NBR 8800:2008, por $\eta_i = \Sigma Q_{Rd} / F_{hd}$ e, quando igual ou superior a 1, representa interação completa, em caso contrário, considera-se interação parcial.

Em que:

ΣQ_{Rd} - é o somatório das resistências individuais de conectores de cisalhamento na viga mista;
 F_{hd} - é força de cisalhamento de cálculo entre o perfil de aço e a laje de concreto, sendo o menor valor entre $A_a f_{yd}$ (força resultante do perfil de aço) e $0,85 f_{cd} b t_c$ (força resultante da laje de concreto)

O valor do grau de interação da viga mista possui limites mínimos a depender na natureza da geometria e materiais constituintes, caso a configuração de uma viga mista apresente uma interação inferior ao valor mínimo dimensionado, os cálculos de dimensionamento de viga mista não são adequados (e admite-se um estudo de perfil de aço

isolado). Segundo a ABNT NBR 8800:2008, as situações previstas para cálculo de interação mínima são:

- Viga mista com perfil de aço com mesas de áreas iguais:

$$\eta_i = 1 - \frac{E}{578f_y} (0,75 - 0,03L_e) \geq 0,40 \text{ para } L_e \leq 25m \quad (12)$$

$$\eta_i = 1 \text{ para } L_e > 25m \text{ (ou seja, interação completa)} \quad (13)$$

Em que:

E - é o módulo de elasticidade longitudinal do perfil de aço;

f_y - é a resistência ao escoamento do aço;

L_e - é o comprimento do trecho de momento positivo em metros

- Viga mista com perfil de aço com mesas de áreas diferentes, com área da mesa inferior ou igual a três vezes a área da mesa superior:

$$\eta_i = 1 - \frac{E}{578f_y} (0,30 - 0,015L_e) \geq 0,40 \text{ para } L_e \leq 20m \quad (14)$$

$$\eta_i = 1 \text{ para } L_e > 20m \text{ (ou seja, interação completa)} \quad (15)$$

2.2.5.3 MOMENTO FLETOR RESISTENTE DE VIGA MISTA DE ALMA CHEIA EM REGIÕES DE MOMENTO POSITIVO

A análise do momento fletor resistente de viga mista de alma cheia é objeto fundamental para entender a capacidade da viga dimensionada ante às cargas provenientes de diferentes combinações, essa seção irá explorar o dimensionamento da capacidade de um perfil à flexão em regiões de momento positivo, o que reflete toda extensão de uma viga mista biapoiada usual (excetuando os pontos de apoio).

A rotina de cálculos para esse dimensionamento é sujeita a condições referentes à natureza da geometria da seção, dos materiais empregados e das ações solicitantes. Durante a

fase de construção, as vigas mistas podem ser escoradas ou não-escoradas, segundo a ABNT NBR 8800:2008, sendo considerada uma viga mista como escorada quando essa possui um perfil de aço isolado com poucas ações solicitantes até retirar-se o escoramento (que ocorre após o concreto atingir 75% da resistência característica à compressão adotada).

A análise do momento fletor resistente da viga mista com escoramento é obrigatória, sendo a análise mediante construção não-escorada opcional, a metodologia de cálculo para essas situações seguirá as orientações normativas da ABNT NBR 8800:2008. Outra consideração a ser feita no dimensionamento proposto nesta seção é o tipo de análise a ser feita, ou seja, se irá considerar as propriedades plásticas ou elásticas da viga mista, essa determinação é especificada segundo 2.2.1.

2.2.5.3.1 CONSTRUÇÃO ESCORADA

2.2.5.3.1.1 ANÁLISE PLÁSTICA DE VIGAS MISTAS

Vigas mistas sujeitas à análise plástica da seção, segundo 2.2.1, possuem rotinas de cálculo dependentes do grau de interação da viga mista e a posição da linha neutra. Generalidades quanto a variáveis presentes nos cálculos matemáticos incluem o coeficiente de 0,85 de f_{ck} , que corresponde à correção do Efeito Rusch, além do valor do coeficiente β_{vm} , que, para vigas mistas biapoiadas, é equivalente a 1,00.

A rotina de cálculo na análise plástica considera as fibras referentes ao perfil do aço com tensão equivalente à resistência ao escoamento de cálculo, enquanto nas fibras da laje de concreto uma tensão igual à resistência característica à compressão do concreto de cálculo.

Para vigas mistas de alma cheia com interação completa e linha neutra da seção plastificada na laje de concreto, o somatório de resistência dos conectores de cisalhamento é maior que F_{hd} (definido em 2.2.1) e a força resistente à compressão da laje de concreto supera a força resistente à tração do perfil de aço. Essas especificações são definidas por:

$$\Sigma Q_{Rd} \geq A_a f_{yd} \quad (16)$$

$$0,85 f_{cd} b t_c \geq A_a f_{yd} \quad (17)$$

Em que:

ΣQ_{Rd} - é o somatório das resistências individuais de conectores de cisalhamento na viga mista;

A_a - é a área do perfil de aço;

f_{yd} - é a resistência ao escoamento de aço de cálculo;

f_{cd} - é a resistência característica à compressão do concreto de cálculo;

b - é a largura efetiva da laje de concreto;

t_c - é a espessura da laje de concreto;

Caso essas determinações sejam atendidas, procede-se à seguinte rotina para dimensionamento de M_{Rd} :

$$C_{cd} = 0,85f_{cd}ba \quad (18)$$

$$T_{ad} = A_af_{yd} \quad (19)$$

$$a = \frac{T_{ad}}{0,85f_{cd}b} \leq t_c \quad (20)$$

$$M_{Rd} = \beta_{vm}T_{ad}(d_1 + h_f + t_c - \frac{a}{2}) \quad (21)$$

Em que:

C_{cd} - é a força resistente de cálculo relativa à compressão da laje de concreto;

a - é a distância do topo da viga de aço à linha neutra na laje de concreto;

T_{ad} - é a força resistente de cálculo relativa à tração do perfil de aço;

d_1 - é a distância do centro geométrico do perfil de aço até a face superior desse perfil;

b - é a largura efetiva da laje de concreto;

t_c - é a espessura da laje de concreto;

Em configuração de viga mista de alma cheia com interação completa com linha neutra da seção plastificada no componente de aço, considera-se ainda $\Sigma Q_{Rd} \geq F_{hd}$, com uma força resistente à tração do perfil de aço superior à força resistente à compressão da laje de concreto. Estas especificações são determinadas por:

$$\Sigma Q_{Rd} \geq 0,85f_{cd}bt_c \quad (22)$$

$$A_a f_{yd} \leq 0,85 f_{cd} b t_c \quad (23)$$

Seguidas essas condições, a rotina de cálculo para determinação de M_{Rd} é:

$$C_{cd} = 0,85 f_{cd} b t_c \quad (24)$$

$$C_{ad} = \frac{1}{2} (A_a f_{yd} - C_{cd}) \quad (25)$$

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} \quad (26)$$

$$M_{Rd} = \beta_{vm} [C_{ad} (d + y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t \right)] \quad (27)$$

Em que:

C_{ad} - é a força resistente de cálculo relativa à compressão do perfil de aço;

d - é a altura do componente de aço da seção;

O cálculo da linha neutra da seção plástica y_p é necessária para determinação de y_t e y_c , na condição apresentada o y_p possui formulação dependente de em qual componente do perfil de aço essa perpassa.

- Para $C_{ad} \leq A_{af} f_{yd}$ admite-se uma linha neutra na mesa superior, com a seguinte formulação:

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{af} f_{yd}} t_f \quad (28)$$

- Para $C_{ad} > A_{af} f_{yd}$ admite-se uma linha neutra na alma, com a seguinte formulação:

$$y_p = t_f + h_w \left(\frac{C_{ad} - A_{af} f_{yd}}{A_{aw} f_{yd}} \right) \quad (29)$$

Em que:

y_p - é a linha neutra plástica da viga mista, a partir da base inferior da viga de aço com orientação positiva para cima;

t_f - é a espessura da mesa superior da viga de aço;

h_w - é a espessura da alma do perfil de aço;

A_{af} - é a área da mesa superior do perfil de aço;

A_{af} - é a área da alma do perfil de aço;

A última situação prevista em norma para vigas mistas sujeitas à análise plástica consiste em uma viga mista de alma cheia com interação parcial, ou seja, uma configuração em que o somatório da resistência de conectores de cisalhamento é inferior tanto à força resistente à compressão da laje de concreto plastificada quanto à força resistente à tração da viga de aço plastificada. Em termos matemáticos, isto é:

$$\Sigma Q_{Rd} < 0,85f_{cd}bt_c \quad (30)$$

$$\Sigma Q_{Rd} < A_a f_{yd} \quad (31)$$

Nessa especificação, considera-se a força resistente de cálculo da espessura comprimida de concreto como equivalente à resistência dos conectores de cisalhamento, ou seja, $C_{cd} = F_{hd}$. Os valores de C_{ad} , T_{ad} e y_p são obtidos de forma equivalente à análise de interação completa com linha neutra no perfil de aço, apenas substituindo o valor de C_{cd} . O valor do momento fletor resistente de cálculo é obtido por:

$$M_{Rd} = \beta_{vm}[C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd}\left(t_c - \frac{a}{2} + h_F + d - y_t\right)] \quad (32)$$

Sendo:

$$a = \frac{C_{cd}}{0,85f_{cd}b} \quad (33)$$

Em que:

y_t - é a distância do centro geométrico da seção tracionada do perfil de aço à base inferior do perfil de aço;

y_c - é a distância do centro geométrico da seção comprimida do perfil de aço à base inferior do perfil de aço;

h_F - é a altura das nervuras da fôrma de aço incorporada (para lajes maciças equivale a 0);

d - é a altura da seção transversal do perfil de aço;

2.2.5.3.1.2 ANÁLISE ELÁSTICA DE VIGAS MISTAS

Na análise elástica de vigas mistas de aço e concreto, considera-se que a tensão de tração de cálculo na face inferior do componente de aço não pode ser superior a f_{yd} e a tensão de compressão na face superior da laje de concreto não pode ser superior a f_{cd} . As duas tensões podem ser determinadas formuladas segundo o grau de interação da viga mista.

- Interação completa:

As tensões referentes ao momento fletor solicitante de cálculo M_{sd} são deduzidas por meio de análise elástica, considerando as propriedades da seção mista homogeneizada, definida em 2.2.3. Os valores das tensões de cálculo correspondentes são, segundo a ABNT NBR 8800:2008:

$$\sigma_{td} = \frac{M_{sd}}{(W_{tr})_i} \quad (34)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{M_{sd}}{[a_E(W_{tr})_s]} \quad (35)$$

Em que:

M_{sd} - é o momento solicitante de cálculo;

$(W_{tr})_i$ - é o módulo de resistência elástica inferior da seção homogeneizada segundo a Equação 8;

$(W_{tr})_s$ - é o módulo de resistência elástica superior da seção homogeneizada segundo a Equação 9;

a_E - é a razão modular da homogeneização da viga mista (Ver 2.2.3);

Dessa forma, substituindo σ_{td} por f_{yd} e σ_{cd} por f_{cd} nas duas equações, afere-se valores possíveis de M_{sd} , o menor dos dois será considerado o momento fletor resistente de cálculo.

- Interação parcial:

A determinação de tensões é equivalente à situação de interação completa, apenas alterando o valor de $(W_{tr})_i$ para W_{ef} , que, segundo a ABNT NBR 8800:2008, equivale a:

$$W_{ef} = W_a + \sqrt{\frac{\Sigma Q_{Rd}}{F_{hd}}} [(W_{tr})_i - W_a] \quad (36)$$

Em que:

W_a - é o módulo de resistência elástico inferior do perfil isolado de aço;

ΣQ_{Rd} - é o somatório das resistências individuais de conectores de cisalhamento na viga mista;

F_{hd} - é força de cisalhamento de cálculo entre o perfil de aço e a laje de concreto, sendo o menor valor entre $A_a f_{yd}$ (força resultante do perfil de aço) e $0,85 f_{cd} b t_c$ (força resultante da laje de concreto)

2.2.5.3.2 CONSTRUÇÃO NÃO-ESCORADA

A verificação de momento fletor resistente para construções não-escoradas são sustentadas pela análise desse resultado para construções escoradas segundo 2.2.5.3.1 somadas às seguintes especificações da ABNT NBR 8800:2008:

- O perfil de aço isolado deve ter resistência de cálculo suficiente a todas ações de cálculo aplicadas antes do concreto atingir uma resistência equivalente a $0,75f_{ck}$;
- Em vigas mistas de alma cheia biapoiadas dimensionadas por análise elástica, deve-se ter na mesa inferior da seção mais solicitada:

$$\left(\frac{M_{Ga,Sd}}{W_a} \right) + \left(\frac{M_{L,Sd}}{W_{ef}} \right) \leq f_{yd} \quad (37)$$

Em que:

$M_{Ga, sd}$ e $M_{L, sd}$ - são os momentos fletores solicitantes de cálculo provenientes das ações atuantes, respectivamente, antes e depois da resistência do concreto atingir $0,75f_{ck}$;

W_a - é o módulo de resistência elástico inferior do perfil isolado de aço;

W_{ef} - é o módulo de resistência elástico efetivo da seção mista, definido na Equação 36

Em situação de análise da estrutura mediante não-escoramento, procede-se à análise da viga de aço isolada, por meio da determinação de sua capacidade mecânica a diferentes situações de cálculo, o que é determinado em 2.3.

2.3 ANÁLISE DE VIGA DE AÇO ISOLADA

A análise de propriedades mecânicas dos componentes estruturais é fundamental para sustentar a validade da segurança da obra de construção civil. Vide a solidariedade entre um componente de aço e uma faixa de laje de concreto na viga mista, em certas situações faz-se necessário entender a capacidade a diferentes solicitações a que o perfil de aço isolado pode estar sujeito, dentre essas situações está a construção não-escorada de vigas mistas de aço e concreto, detalhada em 2.2.5.3.2.

A propriedade a ser analisada para análise de capacidade das vigas de aço isoladas será o momento fletor resistente de cálculo em perfis I, mediante instruções da ABNT NBR 8800:2008, no Anexo G, sob a óptica dos estados-limites de flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local da mesa comprimida (FLM) e flambagem local da alma (FLA). Essa análise é fundamentada em parâmetros de esbeltez denominados λ , λ_r e λ_p , além do momento fletor de flambagem elástica M_{cr} e o momento fletor no início de escoamento M_r , que terão valor determinado pela natureza do estado-limite analisado.

Um valor importante para análise estrutural dos estados-limites últimos é o momento de plastificação M_{pl} , que pode ser definido como o momento fletor da seção analisada em regime plástico, equivalente a:

$$M_{pl} = Z_x * f_y \quad (38)$$

Em que:

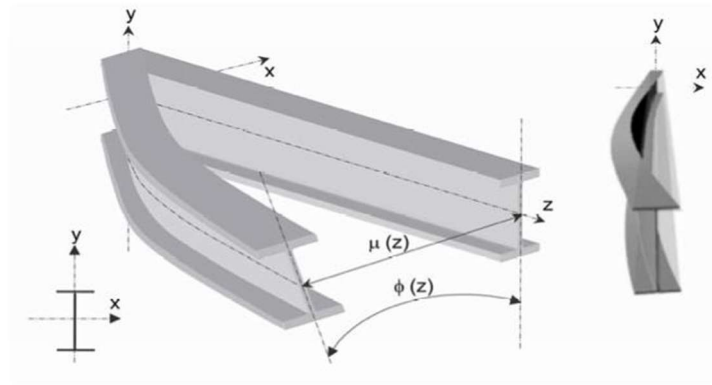
Z_x é o módulo de resistência plástico da seção;

f_y é a resistência ao escoamento do perfil de aço

2.3.1 FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO

A flambagem lateral com torção é um fenômeno de instabilidade ocorrido em uma viga reta, em que ocorre uma flexão lateral, ortogonal ao plano de carregamento, ocorrendo um deslocamento $\mu(z)$ do centro de torção, além de uma torção caracterizada pela rotação $\phi(z)$ (SOUZA, 1999).

Figura 9 - Flambagem lateral com torção



Fonte: SAYED-AHMED (2004, apud Bezerra, 2011)

Para essa situação de cálculo, os parâmetros de esbeltez elencados são:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (39)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (40)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (41)$$

Em que:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W}{E J} \quad (42)$$

$$C_w = \frac{I_y(d-t_f)^2}{4} \quad (43)$$

Em que:

L_b - é máximo comprimento destravado lateralmente da viga de aço;

r_y - é o raio de giração em relação ao eixo Y (Ver Figura 9);

E - é o módulo de elasticidade longitudinal do perfil de aço;

f_y - é a resistência ao escoamento do aço;

J - é a constante de torção da seção transversal da viga de aço;

I_y - é o momento de inércia no eixo Y;

W - é o módulo de resistência elástica da seção transversal da viga de aço;

σ_r - é a tensão residual na viga de aço;

d - é a altura da seção transversal da viga de aço;

t_f - é a espessura da mesa

Nesse estado-limite, o momento fletor no início de escoamento M_r é definido como:

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W \quad (44)$$

Considera-se a tensão residual σ_r como 30% da resistência ao escoamento f_y adotada.

O momento fletor de flambagem elástica M_{cr} para FLT é dado por:

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (45)$$

Em que:

C_b - é o fator de modificação para momento fletor não uniforme;

Dessa forma, calcula-se o momento fletor resistente de cálculo a partir das seguintes situações:

a) Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (46)$$

b) Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (47)$$

c) Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (48)$$

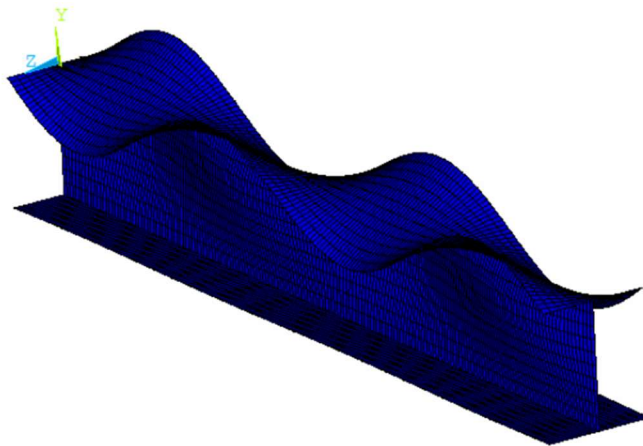
Em que:

γ_{a1} - é o coeficiente de ponderação de resistência do aço no estado-limite último para escoamento, flambagem e instabilidade, conforme a Tabela 1

2.3.2 FLAMBAGEM LOCAL DA MESA COMPRIMIDA

O estado-limite de flambagem local da mesa comprimida (FLM) representa uma configuração em que o perfil de aço analisado apresenta usualmente um eixo reto com placas comprimidas em formato ondulado na direção longitudinal, sendo essas as mesas do perfil I (SOUZA, 2006).

Figura 10 - Flambagem local da mesa comprimida



Fonte: SOUZA (2006)

Para esse estado-último, os parâmetros de esbeltez elencados são:

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad (49)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (50)$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \text{ para perfis laminados} \quad (51)$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}} \text{ para perfis soldados} \quad (52)$$

Onde:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}, \text{ sendo } 0,35 \leq k_c \leq 0,76 \quad (53)$$

Em que:

b - é equivalente à metade da largura da mesa superior;

t - é a espessura da largura da mesa superior;

E - é o módulo de elasticidade longitudinal do perfil de aço;

f_y - é a resistência ao escoamento do aço;

σ_r - é a tensão residual na viga de aço;

h - é a altura da alma da viga de aço;

t_w - é a espessura da viga de aço

Nesse estado-limite, o momento fletor no início de escoamento M_r é definido como:

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W \quad (54)$$

Considera-se a tensão residual σ_r como 30% da resistência ao escoamento f_y adotada.

O momento fletor de flambagem elástica M_{cr} para FLM é dado por:

$$M_{cr} = \frac{0,69 E}{\lambda^2} W_c \text{ para perfis laminados} \quad (55)$$

$$M_{cr} = \frac{0,90 E k_c}{\lambda^2} W_c \text{ para perfis soldados} \quad (56)$$

Dessa forma, calcula-se o momento fletor resistente de cálculo a partir das seguintes situações:

a) Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (57)$$

b) Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (58)$$

c) Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad (59)$$

2.3.3 FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA

A flambagem local da alma (FLA) é um estado-último referente à ocorrência de distorção da alma, quando elementos fletidos ou com cargas externas agem ortogonalmente à direção axial do elemento (ROSSI, 2018).

Figura 11 - Flambagem local da alma



Fonte: SILVA (2017)

Para esse estado-último, os parâmetros de esbeltez elencados são:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (60)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (61)$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (62)$$

Nesse estado-limite, o momento fletor no início de escoamento M_r é definido como:

$$M_r = f_y W \quad (63)$$

Dessa forma, calcula-se o momento fletor resistente de cálculo a partir das seguintes situações:

a) Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (64)$$

b) Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (65)$$

c) Para $\lambda > \lambda_r$:

Nessa situação, deve-se dimensionar o M_{Rd} sob a óptica de viga de alma esbelta, com orientações de cálculo no anexo H da ABNT NBR 8800:2008. Essa tipologia de viga não será contemplada neste estudo mediante a restrição de esbeltez elencada em 2.1.

2.4 VERIFICAÇÃO AO ESFORÇO CORTANTE

O dimensionamento estrutural para barras fletidas necessitam do valor da força resistente de cálculo, V_{Rd} , para consideração dos estados-limites últimos de escoamento e flambagem por cisalhamento. A orientação de verificação segue a ABNT NBR 8800:2008 e será detalhada nesta seção.

A princípio, afere-se o valor da força cortante referente à plastificação da alma por cisalhamento, que é dada por:

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (66)$$

Sendo A_w a área efetiva de cisalhamento, definida como:

$$A_w = d t_w \quad (67)$$

A análise de verificação ao esforço cortante necessita do entendimento de parâmetros de esbeltez elencados em norma, os quais são:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (68)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_V E}{f_y}} \quad (69)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_V E}{f_y}} \quad (70)$$

Nesse estudo será considerada a orientação de $k_V = 5$ para a situação de almas sem enrijecedores transversais.

Dessa forma, calcula-se, para a situação de seção I fletida em relação ao eixo perpendicular à alma, a força resistente de cálculo, V_{Rd} , como:

a) Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (71)$$

b) Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (72)$$

c) Para $\lambda > \lambda_r$:

$$V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (73)$$

Em que:

d - é a altura total da seção transversal;

t_w - é a espessura da alma;

f_y - é a resistência ao escoamento do aço;

h - é a altura da alma;

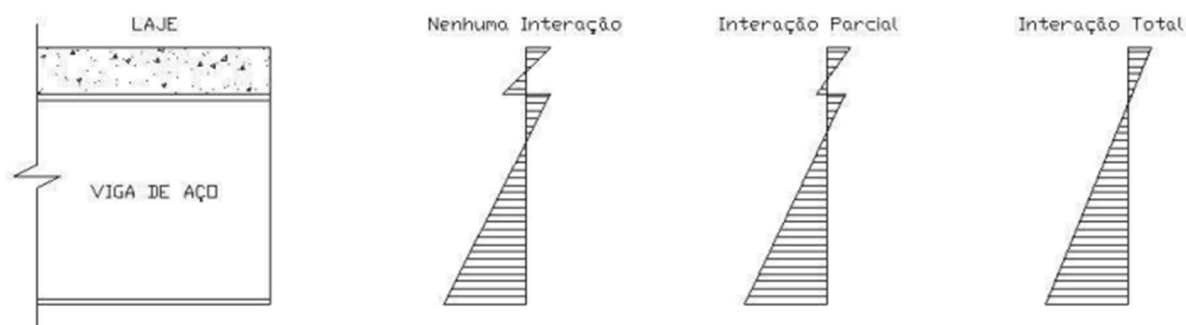
E - é o módulo de elasticidade longitudinal do perfil de aço

2.5 CONECTORES DE CISALHAMENTO

2.5.1 DEFINIÇÃO E GENERALIDADES

O estabelecimento da ligação mecânica entre o perfil de aço e a laje de concreto é feito por meio de conectores de cisalhamento, uma boa aplicação dessa ligação permite uma transmissão de tensões entre os dois materiais, refletindo um mínimo deslocamento relativo entre a laje de concreto e o perfil metálico (CARDOSO, 2006). Especificidades sobre a força resistente de cálculo serão exploradas em 2.5.2 sob a orientação de cálculo da ABNT NBR 8800.

Figura 12 - Grau de interação da seção mista e distribuição de tensões



Fonte: CARDOSO (2006)

As tipologias de conectores de cisalhamento especificadas na ABNT NBR 8800:2008 são de pino com cabeça (Stud-bolts) e perfil U laminado ou formado a frio com espessura de chapa igual ou superior a 3 mm.

Os conectores de cisalhamento stud-bolts são componentes em formato de pino com cabeça que são soldadas no perfil metálico por meio do uso de uma pistola alimentada com energia elétrica.

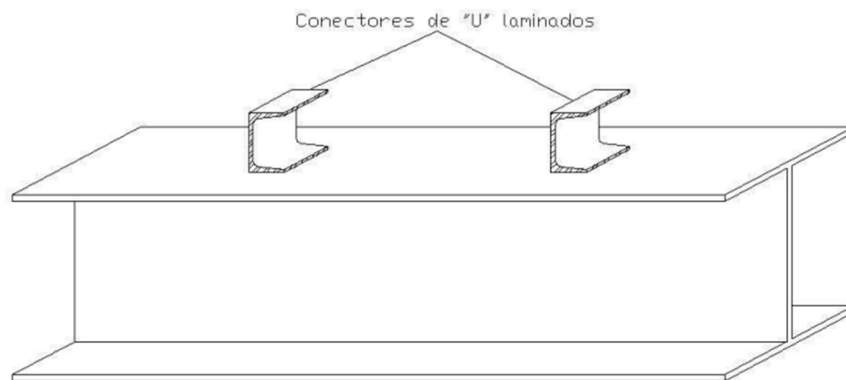
Figura 13 - Conectores de pino de cabeça (Stud bolts)



Fonte: EUROPER (2017)

Os conectores de cisalhamento de perfil U laminado são componentes de baixo custo de produção e execução que são soldados no perfil metálico adotado.

Figura 14 - Conectores de perfil U laminados



Fonte: CARDOSO (2006)

O atendimento às seguintes especificações normativas é obrigatório para o dimensionamento desse componente na estrutura:

- Os conectores do tipo Stud Bolts devem apresentar, após inserção, comprimento de pelo menos 4 vezes seu diâmetro;
- Conectores em perfil U laminado ou formado a frio devem ser unidos à parte superior do perfil de aço através de soldagem contínua, abrangendo pelo menos

as duas extremidades da mesa, a resistência mínima dessa soldagem deve ser igual a 1,25 vez a força resistente de cálculo do conector;

- Todos os tipos de conectores devem ficar completamente embutidos no concreto da laje, tendo cobrimento igual ou superior a 10 mm

2.5.2 FORÇA RESISTENTE DE CÁLCULO

2.5.2.1 PINOS COM CABEÇA (STUD BOLTS)

O valor da força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento de tipo pino com cabeça (Stud Bolt) é a menor resultante das seguintes equações:

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (74)$$

e

$$Q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (75)$$

Em que:

γ_{cs} - é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, sendo 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção, e 1,10 para combinações excepcionais;

A_{cs} - é a área da seção transversal do conector;

f_{ucs} - é a resistência à ruptura do aço do conector;

E_c - é o módulo de elasticidade do concreto;

f_{ck} - é a resistência característica do concreto à compressão;

R_g - é o coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;

R_p - é o coeficiente para consideração da posição do conector

O coeficiente R_g é definido baseado nas seguintes condições:

- R_g é equivalente a 1,00 para um conector soldado em nervura de fôrma de aço ortogonal ao componente de aço, ou para qualquer número de conectores em uma linha soldados diretamente no perfil de aço, ou para qualquer número de conectores em uma linha soldados através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço com uma relação b_f/h_f igual ou superior a 1,5;
- R_g é equivalente a 0,85 para dois conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço ortogonal ao perfil de aço, ou para um conector soldado através de uma fôrma de aço em nervura paralela ao perfil de aço com relação b_f/h_f inferior a 1,5;
- R_g é equivalente a 0,70 para três ou mais conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço ortogonal ao componente de aço

O coeficiente R_p é definido baseado nas seguintes condições:

- R_p é equivalente a 1,00 para conectores soldados diretamente no perfil de aço e, em caso de haver nervuras paralelas a esse perfil, pelo menos 50% da largura da mesa deve estar em contato direto com o concreto;
- R_p é equivalente a 0,75 para conectores soldados em uma laje mista com as nervuras perpendiculares ao perfil de aço e e_{mh} igual ou superior a 50 mm, ou para conectores soldados através de uma fôrma de aço e embutidos em laje mista com nervuras paralelas ao componente de aço da seção;
- R_p é equivalente a 0,60 para conectores soldados em laje mista com nervuras ortogonais ao perfil de aço e e_{mh} inferior a 50 mm

O valor de e_{mh} é definido como a distância da borda do fuste do conector à alma da nervura da fôrma de aço, medida à meia altura da nervura e no sentido da força cortante que atua no conector.

2.5.2.2 PERFIL U LAMINADO OU FORMADO A FRIO

Para um conector de cisalhamento em perfil U laminado ou formado a frio, cuja altura mínima da seção transversal seja de 75 mm e completamente incorporado em uma laje de

concreto maciça, com sua face inferior plana e apoiado diretamente sobre a viga de aço, a força de resistência calculada é:

$$Q_{Rd} = \frac{0,3(t_{fcs} + 0,5t_{wcs})L_{cs}\sqrt{f_{ck}E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (76)$$

Em que:

t_{fcs} - é a espessura da mesa do conector, tomada a meia distância entre a borda livre e a face adjacente da alma;

t_{wcs} - é a espessura da alma do conector;

L_{cs} - é o comprimento do perfil U

2.6 VIBRAÇÕES

O estudo de vibrações em estruturas é fundamental para avaliação do Estado Limite de Serviço (ELS), garantindo um uso adequado e confortável para edificações cuja execução considere esse dimensionamento. A ABNT NBR 8800:2008 provém orientações sobre vibrações em pisos a serem consideradas pelo projetista estrutural, dentre essas orientações estão:

- Para o estado-limite de serviço por vibrações em pisos, considerar as combinações frequentes de serviço de vigas mistas;
- A frequência natural da estrutura do piso não pode ser inferior a 3 Hz.

A mesma norma determina duas soluções para a avaliação da vibração no piso da estrutura, a avaliação precisa e a avaliação simplificada para as atividades humanas normais, essa última pode não constituir solução adequada para o estudo segundo as orientações normativas, então a avaliação precisa será o alvo de estudo nesta seção.

A avaliação precisa é uma metodologia de resolução do problema da vibração que utiliza análise dinâmica, tendo por referência pelo menos os seguintes parâmetros, segundo a ABNT NBR 8800:

- Características e natureza das excitações dinâmicas;

- Critérios de aceitação para conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso;
- A frequência natural do piso;
- A razão de amortecimento modal;
- Os pesos efetivos do piso

Diversos estudos de desenvolvimento da avaliação precisa são referenciados pela ABNT NBR 8800:2008, dentre esses, será analisada a publicação *Floor vibrations due to human activity*, pertencente ao *Steel design guide series 11* e publicado pelo American Institute of Steel Construction e Canadian Institute of Steel Construction.

Conforme essa especificação literária, a avaliação precisa de estruturas para o problema de vibração toma por referência os seguintes fatores, sumarizados por Fruchtengarten:

- Limites para a frequência natural da estrutura;
- Avaliação conjunta com a aceleração de pico;
- Consideração da sensibilidade do usuário;
- Cálculo com apenas cargas permanentes;
- Majoração do módulo de elasticidade longitudinal do concreto em análise dinâmica em 35%

A frequência natural da estrutura pode ser calculada a partir da seguinte relação:

$$f = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\delta}} \quad (77)$$

Em que:

g - é a aceleração da gravidade na superfície Terra;

δ - é a deflexão máxima da viga, obtida conforme análise elástica

Outro parâmetro a ser computado para a análise dinâmica é a aceleração de pico, cuja dedução é dada por:

$$\frac{\alpha_p}{g} = \frac{p_0 e^{-0,35 f_n}}{\beta W} \quad (78)$$

Em que:

p_0 - coeficiente de força constante (Ver Tabela 2);

e - é a constante de Euler;

f_n - é a frequência natural da estrutura;

β - é a razão de amortecimento (Ver Tabela 2);

W - é o peso efetivo do piso

Os limites de aceleração de pico são dados na Tabela 2.

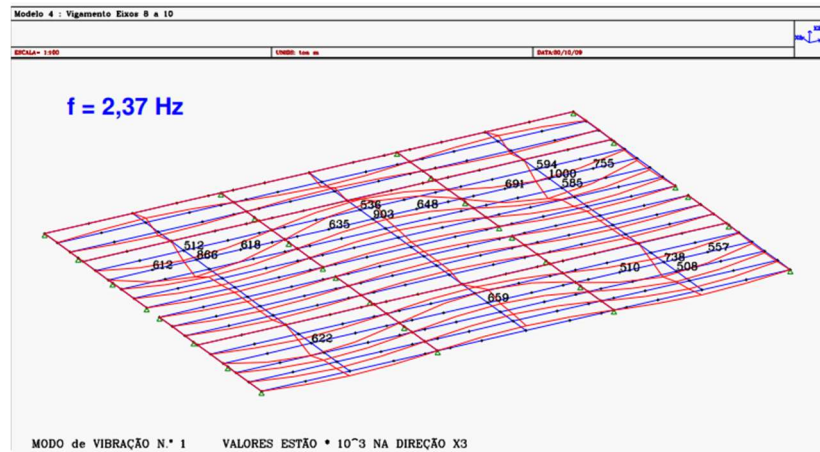
Tabela 2 - Valores recomendados de parâmetros para aceleração de pico e limites de aceleração

	Força constante p_0	Razão de amortecimento β	Limite de aceleração α_o/g
Escritórios, residências, igrejas	0,29 KN	0,02-0,05%	0,5%
Lojas comerciais	0,29 KN	0,02	1,5%
Passarelas internas	0,41 KN	0,01	1,5%
Passarelas externas	0,41 KN	0,01	5,0%

Fonte: AISC Design Guide 11

Com as considerações necessárias para introdução da análise dinâmica, procede-se à previsão da resposta das vibrações por meio das instruções da AISC Design Guide 11. As orientações providas pela publicação determinam uma modelagem por meio de método dos elementos finitos para a estrutura estudada, o que é possível por meio de softwares como o STRAP.

Figura 15 - Modelagem no STRAP para vigas contínuas



Fonte: FRUCHTENGARTEN (2010)

2.7 ANÁLISE EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

2.7.1 DEFINIÇÃO E GENERALIDADES

O dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto requer rigorosa análise de capacidades resistentes considerando diferentes circunstâncias, dentre as mais relevantes está a análise em situação de incêndio. O desempenho estrutural em situação de incêndio representa o resultado de estudo que visa garantir a segurança de pessoas e bens presentes na estrutura dimensionada.

Analisar uma estrutura em situação de incêndio requer conhecimento do tempo em que um elemento estrutural em situação de incêndio-padrão (abordada em 2.7.4) não sofre com colapso estrutural, sendo esse conceito denominado como tempo de resistência ao fogo.

Essa seção estudará as definições normativas da ABNT NBR 14323:2013, que orienta projetos de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Dentre as tipologias estruturais abordadas na norma, o escopo dessa análise será o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto.

2.7.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As propriedades dos materiais da estrutura a ser dimensionada sob situação de incêndio serão determinadas pelas prescrições da NBR 14323:2013, que são aplicáveis a aços estruturais previstos pela ABNT NBR 8800 ou ABNT NBR 14762.

Dentre propriedades mecânicas, serão exploradas variáveis denominadas fatores de redução, que têm por objetivo ponderar propriedades dos materiais baseado na temperatura do componente estrutural analisado. Para uma taxa de aquecimento entre $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$, a Tabela 3 apresenta os fatores de redução, relativos aos valores de 20°C , da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço, respectivamente $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, sendo:

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (79)$$

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{\theta}}{E} \quad (80)$$

Em que:

f_y - é a resistência ao escoamento do aço;

E - é o módulo de elasticidade longitudinal do aço;

$f_{y,\theta}$ - é a resistência ao escoamento do aço em uma temperatura θ ;

E_{θ} - é o módulo de elasticidade longitudinal do aço em uma temperatura

Tabela 3 - Fatores de redução do aço

Temperatura do aço θ_a $^{\circ}\text{C}$	Fator de redução da resistência ao escoamento $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130

800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1000	0,040	0,045
1100	0,020	0,023
1200	0,000	0,000

Fonte: NBR 14323:2013

Para uma taxa de aquecimento entre $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$, a Tabela 4 apresenta os fatores de redução, relativos aos valores de 20°C , da resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local, $k_{\sigma,\theta}$ sendo:

$$k_{\sigma,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (81)$$

Em que:

$f_{y,\theta}$ - é a resistência ao escoamento do aço em uma temperatura θ ;

Tabela 4 - Fatores de redução da resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local

Temperatura do aço θ_a $^{\circ}\text{C}$	Fator de redução da resistência ao escoamento $k_{\sigma,\theta}$
20	1,000
100	1,000
200	0,890
300	0,780
400	0,650
500	0,530
600	0,300
700	0,130
800	0,070
900	0,050

1000	0,030
1100	0,020
1200	0,000

Fonte: NBR 14323:2013

A resistência característica à compressão f_{ck} é uma propriedade cujo valor decresce com o aumento de temperatura, segundo a ABNT NBR 15200 essa relação é formalizada como:

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck} \quad (82)$$

Em que:

$f_{c,\theta}$ - é a resistência característica à compressão na temperatura θ ;

$k_{c,\theta}$ - é o fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ

O valor do fator de redução $k_{c,\theta}$ pode ser deduzido por meio do valor de θ na ABNT NBR 15200:2004, cuja curva analisada neste estudo será a de concreto preparado com agregado gráudo silicoso, por razão de segurança. A massa específica do aço, independente da temperatura do perfil, é equivalente a $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.

O calor específico do aço é adotado como o valor simplificado de $c_a = 600 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$, pela prescrição da ABNT NBR 14323:2013.

2.7.3 FATOR DE MASSIVIDADE

O fator de massividade é um parâmetro da seção transversal do perfil de aço que sustenta a influência da geometria da viga na suscetibilidade à elevação de temperatura ao longo do tempo. A dedução do fator de massividade é dado pela ABNT NBR 14323:2013 como:

$$\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro exposto ao incêndio}}{\text{área da seção transversal}} \quad (83)$$

A unidade de medida do fator de massividade é usualmente expressa em m^{-1} .

Tabela 5 - Fatores de massividade para situações usuais

Descrição	Fator de massividade
Seção com revestimento tipo contorno, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
Seção com revestimento tipo caixa, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(b + d)}{\text{área da seção da peça de aço}}$
Seção com revestimento tipo contorno, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço} - b}{\text{área da seção da peça de aço}}$
Seção com revestimento tipo caixa, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{2d + b}{\text{área da seção da peça de aço}}$

Fonte: ABNT NBR 14323:2013

2.7.4 INCÊNDIO-PADRÃO

A análise estrutural para a situação de incêndio necessita de orientações sobre o comportamento da temperatura em materiais ao longo do tempo de resistência ao fogo da estrutura. Nesse contexto, a ABNT NBR 5628:2022 formaliza a curva de temperatura versus tempo dos gases quentes em um incêndio denominado incêndio-padrão, que será a tipologia de incêndio adotada neste estudo. A expressão da temperatura em função do tempo do incêndio-padrão é determinada pela ABNT NBR 14432:2001 como:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log (8 t + 1) \quad (84)$$

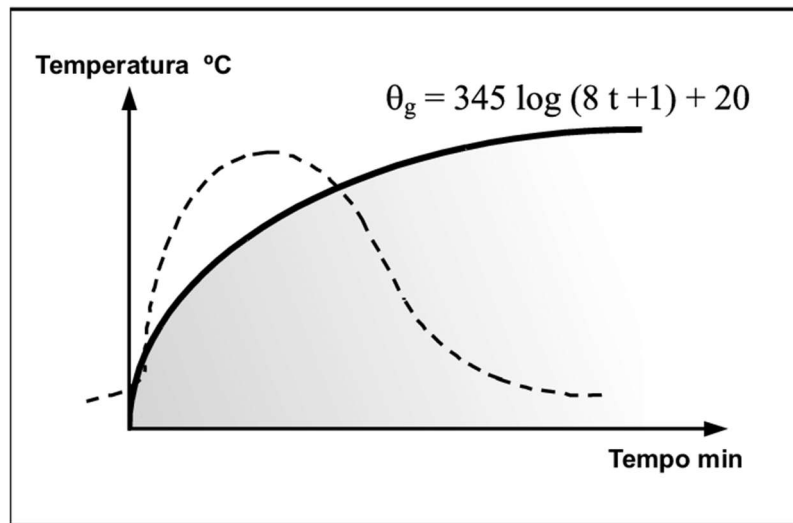
Em que:

θ_g - é a temperatura dos gases em um tempo t ;

θ_0 - é a temperatura ambiente dos gases, equivalente a 20 °C;

t - é o tempo de análise de incêndio

Figura 16 - Curva de incêndio padrão



Fonte: SILVA (2005)

2.7.5 TEMPERATURA NA LAJE DE CONCRETO

Em situação de incêndio, a laje de concreto possui elevação de temperatura que segue critérios para sua determinação, essas orientadas pela ABNT NBR 14323:2013, que se estendem para lajes de concreto maciças moldadas no local, com pré-laje moldada de concreto ou com fôrma de aço incorporada com nervuras reentrantes ou trapezoidais.

Dentre as especificações orientadas pela norma estão:

- A temperatura pode ser considerada constante ao longo da largura efetiva b da laje de concreto;
- Para concreto de densidade normal, a variação de temperatura na altura da laje pode ser aferida na Tabela 6, em função do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), dividindo-se a altura da laje em um máximo de 14 fatias;
- Para concreto de baixa densidade, a variação de temperatura na altura da laje pode ser aferida com os valores da Tabela 5 multiplicados por 0,90.

Tabela 6 - Temperatura na laje de concreto em diferentes faixas de espessura

Fatia		TRRF (min)
-------	--	------------

	Altura y (mm)	30	60	90	120	180
1	0 a 5	535	705	-	-	-
2	5 a 10	470	642	738	-	-
3	10 a 15	415	581	681	754	-
4	15 a 20	350	525	627	697	-
5	20 a 25	300	469	571	642	738
6	25 a 30	210	421	519	591	689
7	30 a 35	180	374	473	542	635
8	35 a 40	180	327	428	493	590
9	40 a 45	160	289	387	454	549
10	45 a 50	140	250	345	415	508
11	50 a 55	125	200	294	369	469
12	55 a 60	110	175	271	342	430
13	60 a 80	80	140	220	270	330
14	≥ 80	60	100	160	210	260

Fonte: NBR 14323:2013

É possível simplificar a temperatura ao longo da laje de concreto adotando um valor uniforme equivalente a:

$$\theta_c = \frac{1}{h_{ef}} \sum_1^n \theta_{c,j} e_j \quad (85)$$

Em que:

$\theta_{c,j}$ - é a temperatura da laje de concreto em uma faixa j em °C;

e_j - é a espessura de uma faixa da laje de concreto em milímetros;

n - é o número de faixas de laje;

h_{ef} - é a altura efetiva da laje em milímetros

O valor da espessura efetiva da laje h_{ef} é determinada no Anexo C da ABNT NBR 14323 como:

$$h_{ef} = t_c + \frac{h_F}{2} \left(\frac{b_1 + b_b}{b_1 + b_2} \right), \text{ para } \frac{h_F}{t_c} \leq 1,5 \text{ e } t_c > 40 \text{ mm} \quad (86)$$

$$h_{ef} = t_c \left(1 + 0,75 \frac{b_1 + b_b}{b_1 + b_2} \right), \text{ para } \frac{h_F}{t_c} > 1,5 \text{ e } t_c > 40 \text{ mm} \quad (87)$$

Em que:

t_c - é a espessura da laje de concreto em milímetros;

h_F - é a altura das nervuras da fôrma de aço em milímetros;

b_b - é a largura inferior das nervuras da fôrma de aço em milímetros;

b_1 - é a largura superior das nervuras da fôrma de aço em milímetros;

b_2 - é o vão entre duas nervuras da fôrma de aço em milímetros

2.7.6 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO PERFIL DE AÇO

2.7.6.1 SEM PROTEÇÃO CONTRA FOGO

Segundo a NBR 14323:2013, para vigas mistas de perfil I sem revestimento contra fogo, a distribuição de temperatura nesse perfil não é uniforme. Segmenta-se, assim, a seção transversal em três partes: mesa inferior, alma e mesa superior, com roteiro de cálculo apresentado nessa seção. Dentre as prescrições normativas está a dispensa da transferência de calor entre as partes da seção transversal da viga de aço e entre a mesa superior da viga e a laje de concreto.

Para um componente estrutural de aço sem revestimento contra fogo, durante um intervalo de tempo Δt , a elevação de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$, em graus Celsius, pode ser aferida por:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{(u/Ag)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (88)$$

Em que:

c_a - é o calor específico do componente de aço em $J/kg/^\circ C$, conforme 2.7.2;

ρ_a - é a massa específica do aço em kg/m^3 , conforme 2.7.2;

u/A_g - é o fator de massividade do componente analisado em m^{-1} , conforme 2.7.3

O valor do fator de sombreamento k_{sh} pode ser dimensionado como:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)_b}{(u/A_g)} \quad (89)$$

Em que:

$(u/A_g)_b$ - é o fator de massividade, definido como a relação entre o perímetro exposto ao incêndio de uma caixa hipotética que envolve o perfil e a área da seção transversal do perfil

O fluxo de calor por unidade de área φ , em watts por metro quadrado, é definido como:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (90)$$

Define-se φ_c como:

$$\varphi_c = a_c(\theta_g - \theta_a) \quad (91)$$

Define-se φ_r como:

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (92)$$

Em que:

φ_c - é o componente do fluxo de calor devido à convecção, em watts por metro quadrado (W/m^2);

φ_r - é o componente do fluxo de calor devido à radiação, em watts por metro quadrado (W/m^2);

a_c - é o coeficiente de transferência de calor por convecção, podendo ser tomado como $25 W/m^2/^\circ C$ para exposição ao incêndio-padrão;

θ_g - é a temperatura dos gases em °C;

θ_a - é a temperatura na superfície do aço em °C;

ε_{res} - é a emissividade resultante, podendo ser tomada como 0,7

O valor do intervalo de cálculo para análise de elevação de temperatura no componente de aço Δt não pode ser superior a 5 segundos.

2.7.6.2 COM MATERIAL DE REVESTIMENTO CONTRA FOGO TIPO CAIXA

Segundo a ABNT NBR 14323:2013, para vigas mistas de perfil I com revestimento contra fogo, caso essa proteção seja do tipo contorno, a distribuição de temperatura não é uniforme no perfil transversal (considera-se a mesma segmentação do perfil de 2.7.6.1), enquanto em perfis com proteção tipo caixa há a consideração de distribuição uniforme de temperatura.

Para perfis com essa configuração, o acréscimo de temperatura no perfil de aço é dado por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m(u_m/A_g)}{t_m c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t}{1 + (\xi/4)} - \frac{\Delta\theta_{g,t}}{(4/\xi) + 1} \quad (93)$$

Sendo:

$$\xi = \frac{(c_m \rho_m) \Delta t}{c_a \rho_a} t_m (u_m/A_g) \quad (94)$$

Em que:

c_a - é o calor específico do componente de aço expressa em $J/kg/^\circ C$, conforme 2.7.2;

ρ_a - é a massa específica do aço expressa em kg/m^3 , conforme 2.7.2;

u_m/A_g - é o fator de massividade para elementos estruturais envolvidos por material de revestimento contra fogo em m^{-1} ;

u_m - é o perímetro efetivo do material de revestimento contra fogo, equivalente ao perímetro da face interna do material de revestimento, expresso em metros;

t_m - é a espessura do material de revestimento contra fogo em milímetros;

$\theta_{a,t}$ - é a temperatura do aço no tempo t , expressa em °C;

$\theta_{g,t}$ - é a temperatura dos gases no tempo t , expressa em °C;

λ_m - é a condutividade térmica do material de revestimento contra fogo, expressa em watts por metro e por °C;

ρ_m - é a massa específica do material de revestimento contra fogo, expressa em quilogramas por metro cúbico;

Δt - é o intervalo de tempo de cálculo em segundos

2.7.7 CAPACIDADES RESISTENTES

2.7.7.1 MOMENTO FLETOR RESISTENTE DE CÁLCULO

Segundo a ABNT NBR 14323:2013, o procedimento de dimensionamento de momento fletor resistente de cálculo para vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio em regiões de momentos positivos é análogo ao de temperatura ambiente regido pela ABNT NBR 8800, com as seguintes exigências:

- O módulo de resistência f_y e o módulo de elasticidade E dos componentes do perfil de aço, devem ser multiplicados, respectivamente, pelos fatores de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, obtidos em 2.7.2;
- A resistência característica à compressão do concreto da laje f_{ck} deve ser multiplicada pelo fator $k_{c,\theta}$, obtido a partir da ponderação de cada $k_{c,\theta}$ das fatias da laje de concreto em situação de incêndio, conforme variação de temperatura em fatias da laje de concreto em 2.7.5;
- Os coeficientes de ponderação de resistência do aço e concreto são iguais a 1,0

2.7.7.2 CONECTORES DE CISALHAMENTO

Segundo a ABNT NBR 14323:2013, a força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento em situação de incêndio, $Q_{fi,Rd}$, é dimensionada segundo o procedimento da ABNT NBR 8800, com as seguintes exigências:

- O coeficiente de ponderação da resistência é equivalente a 1,0;

- A resistência característica à compressão f_{ck} e o módulo de elasticidade E_c do concreto de densidade normal, devem ser multiplicados pelo fator de redução $k_{c,\theta}$ para uma temperatura equivalente a 40% da temperatura da mesa superior do perfil de aço;
- A resistência à ruptura do aço do conector à temperatura ambiente f_u deve ser multiplicada por $0,80k_{y,\theta}$, o valor de $k_{y,\theta}$ deve ser obtido para uma temperatura igual a 80% da temperatura da mesa superior do perfil de aço

2.7.7.3 FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO

Segundo a ABNT NBR 14323:2013, a força cortante resistente de cálculo de vigas mistas de alma cheia segue as prescrições da NBR 8800, tendo o valor de ponderação da resistência equivalente a 1,0, associada às seguintes exigências:

- Multiplica-se λ_p e λ_r por 0,85, para obtenção de $\lambda_{p,fi}$ e $\lambda_{r,fi}$, respectivamente (que substituirão λ_p e λ_r , respectivamente);
- Multiplica-se o módulo de elasticidade E por $k_{E,\theta}$;
- Multiplica-se, em seções em que λ não supera $\lambda_{r,fi}$, a resistência ao escoamento f_y por $k_{y,\theta}$ e, nas seções em que o λ supera $\lambda_{r,fi}$, por $k_{\sigma,\theta}$

3 SOBRE O APLICATIVO

3.1 DESENVOLVIMENTO HÍBRIDO COM FLUTTER E DART

As tecnologias de programação adotadas para execução desse estudo foram a linguagem de programação Dart® e o Framework Flutter®, ambas concebidas pela Google®. A linguagem Dart® foi publicada em 2013 como uma linguagem de script para navegadores de Internet, agregando similaridade com outras linguagens consolidadas no mercado, além de ter uma baixa curva de aprendizado e possibilidade de construir a camada lógica de aplicações robustas. O Framework Flutter® é uma ferramenta de desenvolvimento de aplicações publicada em 2017, que possibilita a construção de aplicativos multiplataforma com eficiência e rapidez, sendo base para os aplicativos da Nubank®, Ebay®, The New York Times®, dentre outros.

3.2 VMB Studio® 1.0

A finalidade do programa computacional (VMB Studio®) é dimensionar vigas mistas de aço e concreto biapoiadas em relação a diferentes parâmetros, dentre esses estão:

- a) Momento fletor resistente de cálculo
- b) Número de conectores necessários em meia viga
- c) Posição da linha neutra
- d) Tensão de tração e compressão
- e) Verificação ao esforço cortante
- f) Verificação como viga de aço isolada
- g) Diagramas de solicitações (DEC e DMF)
- h) Deslocamentos na viga
- i) Frequência natural da viga
- j) Dimensionamento em situação de incêndio

3.2.1 ROTINAS DE CÁLCULO

O sequenciamento lógico de rotinas de cálculo utilizado foi elencado sob parâmetros definidos sobre a natureza dos materiais empregados, combinações de cargas, a geometria da

estrutura, além de outros fatores. A formulação geral sobre a rotina lógica reflete a fundamentação teórica apresentada na seção 2.

Figura 17 - Exemplo de código 01 (Equações 12 e 13 - Grau de interação mínima)

```
static double getMinimumInteraction(
    MaterialModel material, Geometry geometry) {
    if (geometry.length > 25) {
        return 1;
    }
    var ni = 1 - 200000 / (578 * material.fy) * (0.75 - 0.03 * geometry.length);
    if (ni >= 1) {
        return 1;
    }
    return ni < .40 ? .40 : ni;
}
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 18 - Exemplo de código 02 (Equação 66 - força cortante referente à plastificação da alma por cisalhamento)

```
static double getVp1(Geometry geometry, double fy) {
    var d = geometry.hwSoul + geometry.tfInf + geometry.tfSup;
    var tw = geometry.twSoul;
    var Aw = d * tw;
    return 0.60 * Aw * fy;
}
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.2 FONTES EXTERNAS DE DADOS

A sequência executiva da estrutura lógica do aplicativo necessitou da inserção de dados provenientes de bases de dados externas, sendo majoritariamente em forma de tabelas no formato CSV (valores separados por vírgula). Dentre os dados que foram inseridos no aplicativo provenientes de fontes externas, estão:

- Tabela de dados geométricos de perfis laminados: Tabela CSV proveniente do website Fábrica do Projeto;
- Tabela de dados geométricos de perfis soldados: Tabela CSV proveniente do website Fábrica do Projeto;

- Fatores de redução de resistência ao escoamento do aço, módulo de elasticidade do aço e resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local: Tabela CSV adaptada da ABNT NBR 14323:2013;
- Temperaturas em diferentes faixas de uma laje de concreto em situação de incêndio: Tabela CSV adaptada da ABNT NBR 14323:2013;
- Fator de redução da resistência característica à compressão do concreto: Código computacional baseado na curva de valores da ABNT NBR 15200:2004

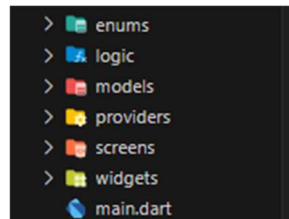
3.2.3 ESTRUTURA DE DIRETÓRIOS E DEPENDÊNCIAS

O código-fonte do VMB Studio® foi estruturado a partir do ambiente de desenvolvimento de um projeto em Flutter® e Dart®, o qual possui uma grande quantidade de arquivos de configuração e de módulos externos. O diretório mais importante para o desenvolvimento é a pasta “lib”, na qual foram inseridos os seguintes arquivos e diretórios para estruturação da solução:

- main.dart: Esse arquivo contém a função “main”, que é a primeira a ser instanciada na execução do aplicativo, sendo a base de execução do restante do código;
- enums: Esse diretório contém arquivos que especificam possíveis características de objetos usuais (por exemplo, se um perfil de aço é soldado ou laminado);
- logic: Esse diretório contém todos arquivos referentes à camada lógica da aplicação, contendo todas fórmulas para dimensionamento estrutural;
- models: Esse diretório contém as classes referentes aos objetos da aplicação, sendo fundamental para o transporte de informações entre diferentes telas;
- providers: Esse diretório contém arquivos que irão armazenar dados de entradas por parte do usuário para permitir o fluxo de informações no aplicativo;
- screens: Esse diretório contém arquivos com a estruturação visual das páginas, sendo a pasta com maior parte dos componentes de estilização do aplicativo;

- widgets: Esse diretório contém arquivos com pequenos componentes visuais para facilitar a construção da interface de usuário

Figura 19 - Diretórios principais do código-fonte



Fonte: Elaborado pelo Autor

As dependências do aplicativo (módulos externos) são definidos no arquivo “pubspec.yaml”, essas são essenciais para adicionar funcionalidades não incluídas no código nativo. Dentre os módulos mais importantes definidos no aplicativo, estão:

- provider: Gerencia os dados dentro da aplicação e permite o transporte de informações entre telas;
- fl_chart: Permite a construção de gráficos na interface visual (essencial para construção de diagramas de esforços solicitantes);
- pdf: Permite gerar arquivos em pdf;
- share: Permite o compartilhamento de arquivos na aplicação;
- csv: Permite a leitura de arquivos em formato CSV

Figura 20 - Dependências do aplicativo

```
dependencies:  
  flutter:  
    sdk: flutter  
  provider:  
  fl_chart: ^0.62.0  
  pdf:  
  share: ^2.0.0  
  flutter_native_splash:  
  cupertino_icons: ^1.0.2  
  csv: ^5.0.2  
  path_provider: ^2.0.14
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.4 EXEMPLOS DE CÁLCULO

3.2.4.1 EXEMPLO DE CÁLCULO 1

Para o exemplo de cálculo 1, foram determinadas as seguintes considerações, com parâmetros baseados em uma rotina de cálculo de notas de aula de Jairo Fruchtengarten (descontando ações de cargas variáveis de ocupação e sobrecarga de construção, as notas de aula estão referenciadas neste estudo):

Tabela 7 - Exemplo de cálculo 1

Perfil de aço	
Tipo	Soldado
Perfil	VS 450 X 60
Comprimento (m)	12
Resistência ao escoamento (MPa)	300
Laje de concreto	
Tipo	Maciça
Espessura (mm)	120
Largura efetiva (mm)	2500
Resistência característica à compressão (MPa)	25
Densidade	Concreto armado com densidade normal
Temperatura	
Análise	Temperatura ambiente e em situação de incêndio
Tempo requerido de resistência ao fogo (min)	60
Intervalo de cálculo (s)	5
Proteção do perfil	Sem proteção
Combinação de cargas	
Tipo de construção	Escritório
Caracterização do piso	Poucos componentes não estruturais

Construção escorada	Momento fletor nominal (KNm)	152,86
	Momento fletor de cálculo (KNm)	214
Construção não-escorada	Momento solicitante nominal aplicado antes do concreto atingir 0,75 fck (KNm)	104,28
	Momento solicitante de cálculo aplicado antes do concreto atingir 0,75 fck (KNm)	146
	Momento solicitante nominal aplicado após o concreto atingir 0,75 fck (KNm)	48,57
	Momento solicitante de cálculo aplicado após o concreto atingir 0,75 fck (KNm)	68
	Máximo comprimento destravado lateralmente (m)	6
	Fator de modificação Cb	1,3
Conectores de cisalhamento		
Tipo	Cabeça com pino (Stud bolts)	
Diâmetro (mm)	19,1	
Limite de resistência à tração do aço do conector (MPa)	415	

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.5 VERIFICAÇÃO DE RESULTADOS

A verificação da eficácia para os resultados propostos pelo software mobile foi realizada da seguinte forma:

1. Verificação analítica, aplicando as rotinas de cálculos propostas na seção 2 e verificação dos valores obtidos (Apresentado no Apêndice A). Como determinados cálculos são apenas viáveis por auxílio computacional robusto, essa verificação será feita para os seguintes parâmetros:
 - a. Propriedades geométricas avançadas do perfil de aço
 - b. Determinação do tipo de análise (plástica ou elástica)
 - c. Resistência dos conectores de cisalhamento e número de conectores
 - d. Tensões atuantes
 - e. Linha neutra
 - f. Grau de interação mínima e adotada
 - g. Homogeneização da seção mista
 - h. Verificação como viga de aço isolada
 - i. Limite de tensões na mesa inferior
 - j. Frequência natural da estrutura
 - k. Fator de massividade de componentes do perfil de aço
 - l. Capacidade resistente em situação de incêndio
2. Validação através do Viga Mista 3.0®, software educacional desenvolvido pelo Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, apresentado no Apêndice B;
3. Validação a partir do material referenciado de Jairo Fruchtengarten, que aborda o Exemplo 1

De forma geral, todos resultados postos em análise são apresentados nas seguintes categorias:

1. Parâmetros geométricos da viga isolada
2. Tipo de análise da viga mista
3. Capacidade resistente (Interação completa)
4. Capacidade resistente (Interação parcial)
5. Homogeneização da seção mista
6. Verificação ao esforço cortante
7. Estados-limite da viga de aço isolada

8. Limitação de tensões nas fibras inferiores
9. Deslocamentos
10. Vibrações
11. Fatores de massividade
12. Temperatura de componentes em situação de incêndio
13. Fatores de redução
14. Capacidade resistente em situação de incêndio (Interação completa)

Algumas fontes de verificação não apresentam resultados para certas categorias específicas dentre as citadas anteriormente, dessa forma cada valor aferido pelo VMB Studio estará sujeito à faixa de um a três métodos de verificação simultâneos.

Será admitido como resultado válido do VMB Studio o resultado que apresentar uma diferença inferior a 2,5% do mesmo resultado em todos outros métodos de verificação (exceto em caso de apresentação de possível falha operacional de algum método de verificação).

4 RESULTADOS

Nessa seção, serão apresentados os resultados do desenvolvimento da pesquisa em termos de uma construção e execução eficiente do software VMB Studio®. A interface do usuário e processamento lógico serão abordados para constatar a validade dos resultados propostos entre os objetivos do estudo.

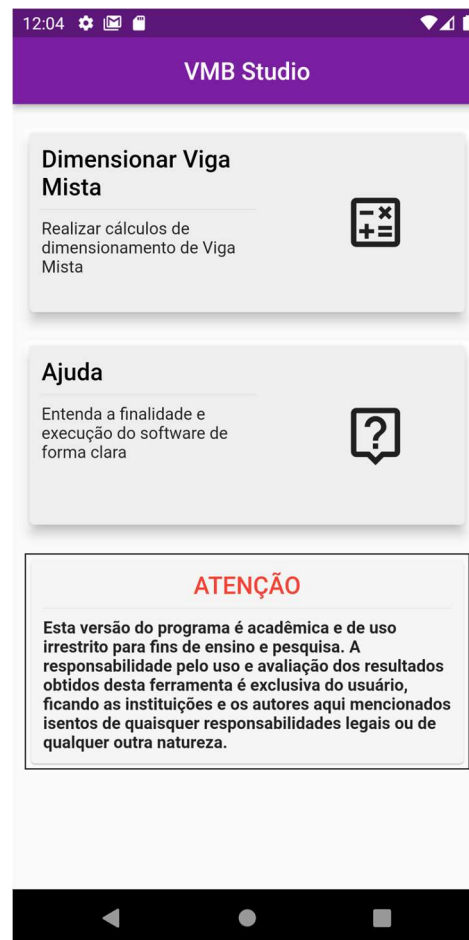
4.1 MANUAL DO USUÁRIO

Nessa subseção, serão exploradas instruções detalhadas sobre o fluxo de telas do software e as principais diretrizes a seguir para garantir resultados precisos e um funcionamento apropriado.

- Tela inicial

Nesta tela, é possível identificar duas opções de rotas para explorar o software, além de um aviso sobre a finalidade educacional do software. Os dois botões presentes na tela levam às páginas de Dados Geométricos e de Ajuda.

Figura 21 - Tela inicial



Fonte: Elaborado pelo Autor

- Tela de Dados Geométricos:

Nesta tela, o operador do software pode informar parâmetros geométricos referentes à estrutura a ser dimensionada. Dentre os dados a serem fornecidos estão a identificação da viga, o tipo de perfil (soldado ou laminado), o perfil transversal, o comprimento total da viga de aço, o tipo de laje de concreto, a largura efetiva e a altura efetiva.

Essas informações são relevantes para determinar a esbeltez da viga de aço, calcular propriedades da seção transversal (momento de inércia, raio de giração, dentre outros) e determinar a capacidade mecânica da estrutura em futuras etapas. O usuário deverá inserir todos dados obrigatórios para avançar para a próxima página, há comportamento equivalente em todas páginas seguintes.

Figura 22 - Tela de Dados Geométricos 1

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 23 - Tela de Dados Geométricos 2

Fonte: Elaborado pelo Autor

Dentre as variáveis que devem ser preenchidas, estão:

- Nome da viga
- Tipo de perfil de aço: Existem dois tipos de perfil I no aplicativo, sendo esses soldado ou laminado
- Perfil de aço: Deverá ser escolhido um perfil de aço dentre mais de 300 opções
- Comprimento total da viga de aço em metros
- Tipo de laje: Existem três tipos de laje disponíveis, sendo essas a laje maciça e as lajes com fôrma de aço incorporada com nervura paralela ou ortogonal à viga de aço.
- Largura efetiva da laje de concreto
- Espessura da laje de concreto (caso a laje seja maciça)
- Geometria da fôrma de aço incorporada (caso a laje possua fôrma de aço incorporada)

Uma observação fundamental sobre essa página é o botão em seu canto superior direito referente ao “Exemplo de Entrada”, que preenche os dados da tela automaticamente com os dados de entrada referentes ao Exemplo 1, explorado em 3.2.4. Essa funcionalidade é importante para orientar o operador de software a como a viga pode ser dimensionada e, em todas telas seguintes, anteriores ao relatório, esse botão está presente na mesma posição para automação dos dados de entrada.

- Tela de Materiais:

Nesta tela, o usuário deverá informar parâmetros referentes às propriedades dos materiais adotados na seção transversal da viga mista. Os parâmetros de resistência característica à compressão do concreto e a resistência ao escoamento do aço são necessários, além da consideração sobre a densidade e armadura empregada na laje de concreto.

Figura 24 - Tela de Materiais

1:53

← Dimensionar viga mista

Componente de aço Exemplo de entrada

fy (MPa) Tensão de escoamento (usualmente 50...)

Laje de concreto

fck (MPa) Resistência característica à compressão

Densidade do concreto

☒ Concreto armado de densidade normal

y (KN/m3) 25 (Valor padrão)

☐ Concreto sem armadura de densidade normal

y (KN/m3) 24 (Valor padrão)

☐ Concreto de baixa densidade com o mínimo de 14,72 KN/m3, sem armadura

y (KN/m3) Peso específico

Avançar

Fonte: Elaborado pelo Autor

Dentre as variáveis que devem ser preenchidas, estão:

- a. Resistência ao escoamento do aço;
 - b. Resistência característica à compressão do concreto;
 - c. Densidade do concreto: Três opções são elencadas, concreto armado de densidade normal com valor fixo de 25 KN por metro cúbico, concreto sem armadura de densidade normal com valor fixo de 24 KN e concreto de baixa densidade com o mínimo de 14,72 KN por metro cúbico e máximo de 21,58 KN por metro cúbico
- Tela de dados de temperatura:

Nesta tela, o operador de software informará os dados de temperatura relativos ao dimensionamento estrutural, tendo como opções de análise a temperatura ambiente (20°C) e análise em situação de incêndio, sendo a análise em temperatura ambiente obrigatória.

Figura 25 - Tela de Dados de Temperatura 1

The screenshot shows a mobile app interface with a purple header bar containing a back arrow and the text 'Dimensionar viga mista'. Below the header, there is a section titled 'Temperatura' with a purple button labeled 'Exemplo de entrada'. Under this section, there are two checked checkboxes: 'Análise em temperatura ambiente' and 'Análise em Situação de Incêndio'. Below the checkboxes, there is a dropdown menu for 'TRRF (min)' with the value '30' selected. Further down, there is a text input field for 'Δt (s) Intervalo de tempo para cálculo' with an information icon (i) to its right. Below this, there is a section titled 'Tipo da Proteção do Perfil' with a dropdown menu showing 'Sem Proteção'. At the bottom of the screen, there is a purple button labeled 'Avançar'.

Figura 26 - Tela de Dados de Temperatura 2

The screenshot shows the same mobile app interface as Figure 25, but with more detailed input fields. The 'Tipo da Proteção do Perfil' section now shows a dropdown menu with 'Proteção Tipo Caixa' selected. Below this, there is a section titled 'Parâmetros C1 e C2 - Espaçamento' with two text input fields: 'C1 - espaçamento vertical (mm)' and 'C2 - espaçamento horizontal (mm)'. Below these, there is a section titled 'Material de Proteção' with four text input fields arranged in two columns: 'Massa específica' (p_m (kg/m³)), 'Calor específico' (C_m (J/Kg°C)), 'Condutividade térmica' (λ_m (W/m°C)), and 'Espessura' (t_m (mm)). At the bottom of the screen, there is a purple button labeled 'Avançar'.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para situação de incêndio, devem-se aplicar as seguintes variáveis:

- a. Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF);
- b. Intervalo de tempo para cálculo

Adicionalmente, caso a proteção seja do tipo contorno, são acrescentados os campos:

- c. Massa específica do material de proteção;
- d. Calor específico do material de proteção;
- e. Condutividade térmica do material de proteção;
- f. Espessura do material de proteção

Caso a proteção seja do tipo caixa, além dos campos já elencados, é necessário preencher:

- g. Espaçamento vertical do material de proteção;
 - h. Espaçamento horizontal do material de proteção
- Tela de combinações de carga:

Nesta tela, o usuário procederá a informar a combinação de cargas aplicada na estrutura, podendo ser essa análise ser feita a nível de construção escorada ou a nível de construção não escorada. A análise com a construção escorada é obrigatória para fins de dimensionamento, enquanto o dimensionamento com construção não escorada é opcional.

Figura 27 - Tela de Combinações de Carga 1

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 28 - Tela de Combinações de Carga 2

Fonte: Elaborado pelo Autor

Deve-se, obrigatoriamente, preencher as seguintes variáveis:

- a. Tipo de construção;
- b. Caracterização do piso;
- c. Momento fletor nominal em construção escorada;
- d. Momento fletor de cálculo em construção escorada.

Para construção não escorada, devem-se aplicar as seguintes variáveis:

- e. Momento fletor nominal aplicado antes de o concreto atingir $0,75f_{ck}$;
- f. Momento fletor de cálculo aplicado antes de o concreto atingir $0,75f_{ck}$;

- g. Momento fletor nominal aplicado após o concreto atingir $0,75f_{ck}$;
- h. Momento fletor de cálculo aplicado após o concreto atingir $0,75f_{ck}$;
- i. Máximo comprimento destravado lateralmente durante a fase de construção;
- j. Fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme CB.

- Tela de conectores:

Nesta tela, o usuário preencherá informações relativas aos conectores de cisalhamento a serem aplicados na estrutura. Duas opções de conectores estão disponíveis: Pino com cabeça (Stud bolts) e Perfil U laminado a frio ou formado a frio (aplicável apenas a lajes maciças).

Figura 29 - Tela de conectores

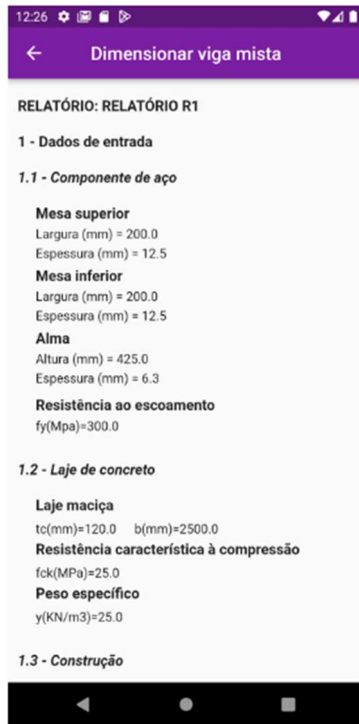
Fonte: Elaborado pelo Autor

Dentre as variáveis que devem ser preenchidas, estão:

- a. Tipo de conector;
 - b. Para conector de pino com cabeça:
 - I. Diâmetro nominal do conector;
 - II. Limite de resistência à tração do aço do conector;
 - III. Para laje com fôrma de aço incorporada com nervuras paralelas à viga de aço:
 - i. Comprimento do pino após a soldagem;
 - ii. Porcentagem de concreto direto sobre a mesa superior do perfil de aço
 - IV. Para laje com fôrma de aço incorporada com nervuras ortogonais à viga de aço:
 - i. Comprimento do pino após a soldagem;
 - ii. Número de conectores de cisalhamento por nervura;
 - iii. Valor de emh (maior ou menor que 50 mm)
 - c. Para conector de pino com cabeça:
 - I. Espessura da mesa do conector;
 - II. Espessura da alma do conector;
 - III. Comprimento do conector
- Tela de relatório:

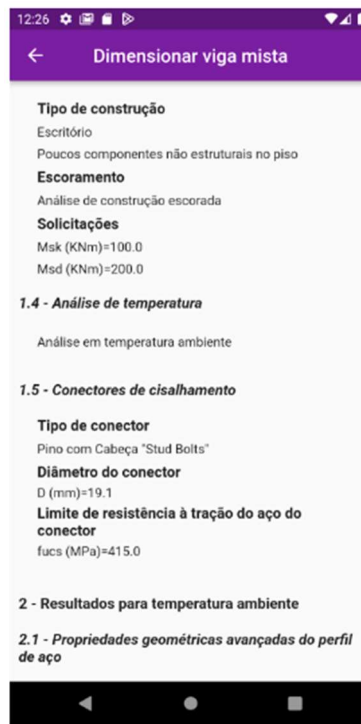
Nesta tela, um relatório será gerado para o usuário contendo todas informações disponíveis no programa relativas ao dimensionamento da viga mista baseado na entrada de dados feita pelo usuário. É possível converter esse relatório para o formato PDF pressionando o botão intitulado “Salvar resultados” no canto inferior da tela, com sugestões diversas de compartilhamento disponíveis.

Figura 30 - Tela de Relatório 1



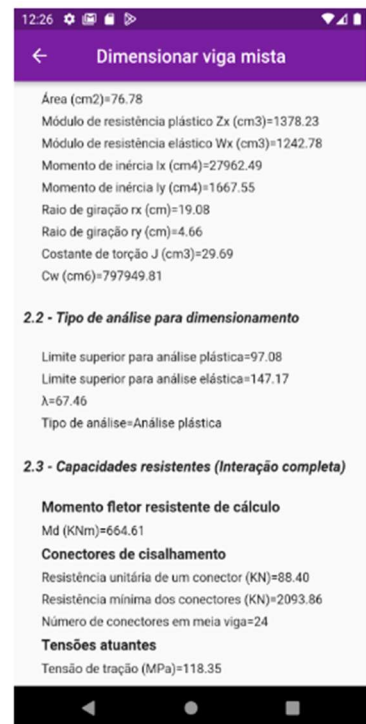
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 31 - Tela de Relatório 2



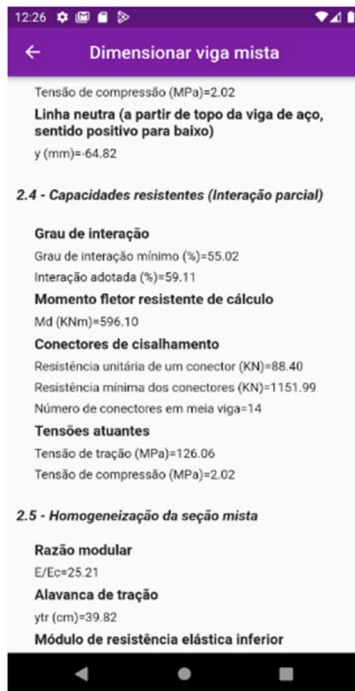
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 32 - Tela de Relatório 3



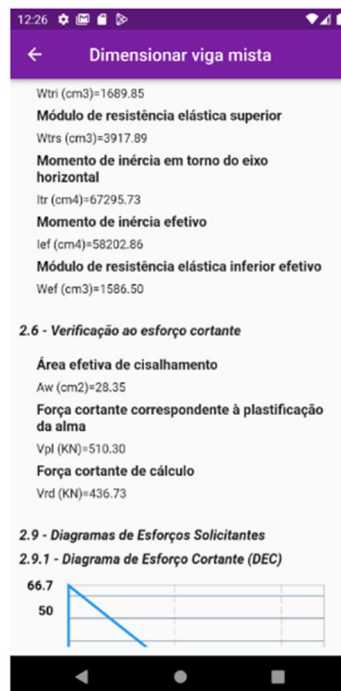
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 33 - Tela de Relatório 4



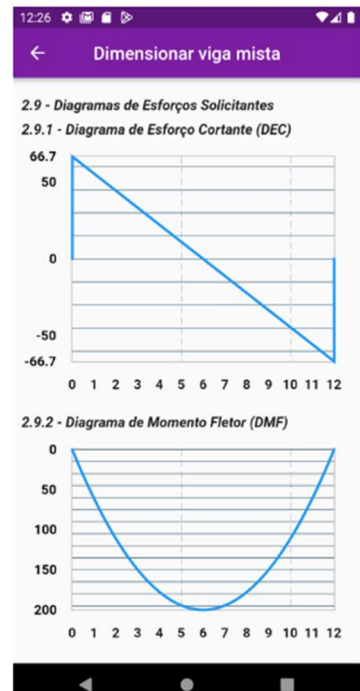
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 34 - Tela de Relatório 5



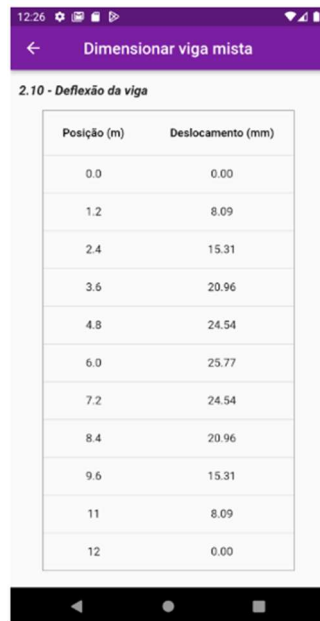
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 35 - Tela de Relatório 6



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 36 - Tela de Relatório 7

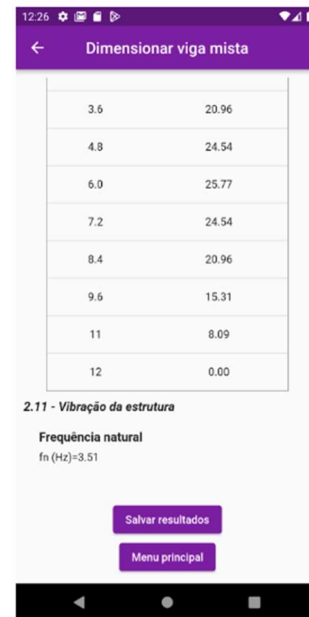


2.10 - Deflexão da viga

Posição (m)	Deslocamento (mm)
0.0	0.00
1.2	8.09
2.4	15.31
3.6	20.96
4.8	24.54
6.0	25.77
7.2	24.54
8.4	20.96
9.6	15.31
11	8.09
12	0.00

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 37 - Tela de Relatório 8



3.6	20.96
4.8	24.54
6.0	25.77
7.2	24.54
8.4	20.96
9.6	15.31
11	8.09
12	0.00

2.11 - Vibração da estrutura

Frequência natural
fn (Hz)=3.51

Salvar resultados

Menu principal

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados elencados pelo programa estão subdivididos nas seguintes categorias:

01. Dados de entrada

- a. Componente de aço
- b. Laje de concreto
- c. Construção
- d. Análise de temperatura
- e. Conectores de cisalhamento

02. Resultados para temperatura ambiente

- a. Propriedades geométricas avançadas do perfil de aço
- b. Tipo de análise para dimensionamento
- c. Capacidades resistentes (Interação completa)
- d. Capacidades resistentes (Interação parcial)
- e. Homogeneização da seção mista
- f. Verificação ao esforço cortante
- g. Verificação como viga de aço isolada (construção não-escorada)
- h. Limite de tensões na mesa inferior (construção não-escorada)

- i. Diagramas de esforços solicitantes
 - i. Diagrama de Esforço Cortante (DEC)
 - ii. Diagrama de Momento Fletor (DMF)
 - j. Deflexão da viga
 - k. Vibração da estrutura
03. Resultados para situação de incêndio
- a. Laje de concreto
 - b. Perfil de aço
 - c. Conectores de cisalhamento
 - d. Capacidades resistentes (Interação completa)

- Tela de Ajuda:

Esta tela possui informações relativas à autoria do projeto, sua finalidade e funcionalidades. Estão incluídos esclarecimentos relativos às unidades de medida, aos perfis de aço, à laje de concreto, aos materiais, à temperatura de dimensionamento, ao escoramento da construção e aos conectores de cisalhamento.

Figura 38 - Tela de Ajuda



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 VALIDAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO PARA EXEMPLO 1

Em termos de validação de resultados, constatam-se um retorno de dados majoritariamente válidos do VMB Studio® para dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto, sendo uma ferramenta viável para dedução da performance mecânica dessa tipologia estrutural. Os dados apresentados referentes ao resultado são as saídas de dados para o Exemplo 1, detalhado em 3.2.4.1.

Em termos gerais, entre os métodos de verificação elencados em 3.2.5, constatou-se uma similaridade entre maior parte dos resultados, apresentando pequenas diferenças, em sua maioria causadas por aproximações de cálculo nas rotinas propostas por cada método.

Dentre os resultados que apresentaram uma diferença significativa (considerar-se-á um desvio maior que 2,5% do VMB Studio®), encontram-se no Viga Mista 3.0® diferenças relativas às tensões atuantes na viga mista, as capacidades resistentes em interação parcial (em temperatura ambiente), a força cortante de cálculo e a limitação de tensões nas fibras inferiores.

Além disso, resultados com divergências superiores a 2,5% foram encontrados na capacidade resistente em interação parcial nas notas de aula de Fruchtengarten. Os outros métodos de verificação tiveram diferenças inferiores a 2,5% em todas comparações com o VMB Studio®.

A justificativa para essas diferenças está em potenciais divergências executivas no Viga Mista 3.0®, que projeta resultados diferentes para grau de interação mínimo de uma viga mista (um exemplo está no Apêndice D, em que, para uma estrutura de comprimento de 25 metros, a interação deveria ser completa). Em termos da força cortante de cálculo, o Viga Mista 3.0® aparenta adotar a altura da alma no cálculo de área efetiva de cisalhamento (a constatação está no Apêndice E), enquanto as orientações normativas orientam adotar a altura da seção transversal. Em termos das tensões atuantes e limitação de tensões na viga mista, considerar-se-á os resultados da VMB Studio® como válidos por razão da verificação analítica, além da validação da homogeneização da seção mista por todas fontes de verificação aplicáveis. Em relação à diferença presente nas notas de aula de Fruchtengarten em termos da capacidade resistente em interação parcial, justifica-se que o roteiro de cálculo de Fruchtengarten adotou um grau de interação diferente do imposto pela metodologia de seleção do VMB Studio, o que é permitido por ser da escolha do projetista estrutural (desde que esteja acima do grau de interação mínimo).

Tabela 8 - Resultados de parâmetros geométricos da viga isolada

	VMB Studio®	Verificação analítica	Notas de aula de Fruchtengarten
Área (cm ²)	76,78	76,78	76,78
Z _x (cm ³)	1378,23	1378,23	1378
W _x (cm ³)	1242,78	1242,78	1243
I _x (cm ⁴)	27962,49	27962,49	27962
I _y (cm ⁴)	1667,55	1667,55	-
r _x (cm)	19,08	19,08	19,08
r _y (cm)	4,66	4,66	4,66
J (cm ⁴)	29,69	29,69	29,6
C _w (cm ⁶)	797949,81	797948,73	797526

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 9 - Resultados de tipo de análise da viga mista

	VMB Studio®	Verificação analítica	Notas de aula de Fruchtengarten
Limite superior para análise plástica	97,08	97,08	97,1
Limite superior para análise elástica	147,17	147,17	-
h/tw	67,46	67,46	67,5
Tipo de análise	Plástica	Plástica	Plástica

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 10 - Resultados de capacidade resistente em interação completa

	VMB Studio®	Verificação analítica	Viga Mista 3.0®	Notas de aula de Fruchtengarten
Momento fletor resistente (KNm)	664,61	664,61	664,61	665
Resistência de um conector (KN)	88,40	88,40	-	87,5
Resistência mínima dos conectores (KN)	2093,86	2093,862	2093,86	2094
Número de conectores em meia viga	24	24	24	24
Tensão atuante de tração (MPa)	126,64	126,63	38,7	-
Tensão atuante de compressão (MPa)	2,17	2,17	0,5	-
Linha neutra (a partir do tipo da viga de aço, orientação positiva para baixo) (mm)	-64,82	-64,82	-64,82	-64,8

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 11 - Resultados de capacidade resistente em interação parcial

	VMB Studio®	Verificação analítica	Viga Mista 3.0®	Notas de aula de Fruchtengarten
Grau de interação mínimo (%)	55,02	55,02	40	55
Grau de interação adotado (%)	59,11	59,11	-	60
Momento fletor resistente (KNm)	596,10	592,86	555,15	598
Resistência de um conector (KN)	88,40	88,40	-	87,5
Resistência mínima dos conectores (KN)	1151,99	1152,04	837,55	1256
Número de conectores em meia viga	14	14	10	15
Tensão atuante de tração (MPa)	134,89	134,88	81,9	-
Tensão atuante de compressão (MPa)	2,17	2,17	2,3	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 12 - Resultados de homogeneização da seção mista

	VMB Studio®	Verificação analítica	Notas de aula de Fruchtengarten
Razão modular E/Ec	25,21	25,21	-
Alavanca de tração (cm)	39,82	39,82	39,8
Módulo de resistência elástica inferior (cm ³)	1689,85	1690,01	1690
Módulo de resistência elástica superior (cm ³)	3917,89	3917,13	-

Momento de inércia em torno do eixo horizontal (cm ⁴)	67295,73	67296,28	67296
Momento de inércia efetivo (cm ⁴)	58202,86	58.203,50	58430
Módulo de resistência elástica inferior efetivo (cm ³)	1586,50	1.586,62	1589

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 13 - Resultados de verificação ao esforço cortante

	VMB Studio®	Verificação analítica	Viga Mista 3.0®
Área efetiva de cisalhamento (cm ²)	28,35	28,35	-
Força cortante correspondente à plastificação da alma (KN)	510,30	510,30	-
Força cortante de cálculo (KN)	436,73	436,75	412.47

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 14 - Resultados de estados-limite da viga de aço isolada

	VMB Studio®	Verificação analítica	Viga Mista 3.0®	Notas de aula de Fruchtengarten
Momento de plastificação (KNm)	413,47	413,47	-	413
Mrd para FLA (KNm)	375,88	375,88	375,88	-
Mrd para FLM (KNm)	375,88	375,88	375,88	-
Mrd para FLT (KNm)	291,65	291,41	294,20	288

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 15 - Resultados para limitação de tensões nas fibras inferiores

	VMB Studio®	Verificação analítica	Viga Mista 3.0®	Notas de aula de Fruchtengarten
Limite de tensões (MPa)	160,34	160,34	145,30	159,90

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 16 - Resultados para deslocamentos

	VMB Studio®	Verificação analítica	Notas de aula de Fruchtengarten
Flecha máxima (mm)	47,92	47,92	47

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 17 - Resultados para vibração da estrutura

	VMB Studio®	Verificação analítica
Frequência natural da estrutura (Hz)	2,57	2,58

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 18 - Resultados para fatores de massividade

	VMB Studio®	Verificação analítica	Viga Mista 3.0®
Mesa superior do perfil de aço (m-1)	90	90	90
Mesa inferior do perfil de aço (m-1)	322,17	322,17	322,17
Alma da viga de aço (m-1)	170	170	170

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 19 - Resultados para temperaturas em situação de incêndio

	VMB Studio®	Viga Mista 3.0®
Fator ksh para correção de sombreamento	0,67	0,66
Laje de concreto (°C)	263,25	263,25
Mesa superior do perfil de aço (°C)	933,32	933,70
Mesa inferior do perfil de aço (°C)	942,33	942,73
Alma da viga de aço (°C)	939,45	939,85

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 20 - Resultados para fatores de redução em análise de incêndio

	VMB Studio®	Viga Mista 3.0®
Ky da mesa superior do perfil de aço	0,05	0,05
Ky da mesa inferior do perfil de aço	0,05	0,05
Ke da alma da viga de aço	0,06	0,06
Kc relativa à compressão da laje de concreto	0,89	0,87
Kc relativa à compressão do concreto para cálculo de conectores	0,78	0,78
Ky do aço do conector de cisalhamento	0,17	0,17

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 21 - Resultados para capacidade resistente em análise de incêndio com interação completa

	VMB Studio®	Verificação analítica	Viga Mista 3.0®
Momento fletor resistente (KNm)	41,41	41,41	41,35
Resistência mínima dos conectores (KN)	120,48	120,48	120,30
Linha neutra (a partir do topo da viga de aço, orientação positiva para baixo) (mm)	-117,44	-117,45	-117,39

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em relação aos resultados aferidos, é notável a redução das capacidades resistentes da viga mista mediante a situação de incêndio, com um decréscimo superior a 90% de momento fletor resistente de cálculo e superior a 70% na resistência mínima dos conectores (ambas em interação completa), além da alteração da posição da linha neutra (de forma que incluiu maior parcela da laje de concreto nas fibras tracionadas da seção).

De forma geral, dentre as categorias de resultados especificadas em 3.2.5, constatou-se similaridade entre todos métodos de verificação em 51 dos 61 resultados provenientes da Tabela 8 à Tabela 21, é importante ressaltar que os 10 resultados com valores consideravelmente diferentes vieram majoritariamente da mesma fonte de verificação (Viga Mista 3.0®) e foram justificados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do estudo, constata-se certas observações quanto à natureza do conteúdo que foi abordado:

- O desenvolvimento técnico dos cálculos de vigas mistas de aço e concreto é um procedimento extenso e detalhado que solicita uma análise profunda do projetista da estrutura, o que torna necessária a presença de um programa computacional que automatize esses cálculos e as verificações relativas às condições da estrutura;
- O VMB Studio® demonstrou qualificação como software para dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto, os resultados de dimensionamento retornados pela ferramenta foram verificados por meio de método analítico e fontes de rotinas de cálculo computacionais e acadêmicas;
- O desempenho estrutural de vigas mistas de aço e concreto decresce consideravelmente em situação de incêndio, tendo nas capacidades resistentes uma redução no momento fletor resistente de cálculo e resistência mínima dos conectores, além da alteração da posição da linha neutra;
- Para a estruturação de uma análise mais acurada, é necessária a implementação de rotinas de cálculo que considerem a vibração da estrutura por meio de análise dinâmica de vibrações com método dos elementos finitos, por fim a demonstrar conformidade da estrutura ao estado-limite de serviço

5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Uma observação pertinente ao estudo articulado foi que nem todas situações de cálculo para vigas mistas de aço e concreto foram abordadas, restringindo-se a rotinas usuais para uma estrutura biapoiada com distribuição linear de cargas, sem aplicação de esforços de torção e sem restrição de rotação nas vinculações. Dessa forma, situações tais como vigas mistas contínuas, semicontínuas e em balanço são alvos interessantes para futuras pesquisas relativas ao conteúdo deste estudo, pois abordam conceitos não analisados como momento fletor resistente e conectores de cisalhamento em regiões de momento fletor negativo.

A temática de vibrações na estrutura, abordada em 2.6, foi abordada apenas para obtenção de resultado de frequência natural da viga mista, dada a complexidade de realização da simulação de análise precisa de vibrações por meio do método dos elementos finitos. Desenvolver simulações de vibrações na estrutura é uma área de pesquisa que complementaria o atual projeto em verificações de Estado Limite de Serviço.

Por fim, para uma abrangência maior das estruturas mistas de aço e concreto, uma recomendação de pesquisa com grande relevância é o desenvolvimento de um software mobile para o dimensionamento de lajes e pilares mistos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FONSECA, FLÁVIO; **Dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto conforme a ABNT NBR 8800:2008**. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

FAKURY, R.H.; **Sobre a revisão da norma brasileira de projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto, a NBR 8800**. Ouro Preto: R. Esc. Minas, 2007.

SÁ, ACÁCIA; SANTOS, WENDEL; **Estruturas mistas aço e concreto**. Caratinga: Doctum, 2014.

PELKE, EBERHARD; KURRER, KARL-EUGEN; **On the evolution of Steel-Concrete composite construction**. Chicago: 5th International Congress on Construction History, 2015.

INSTITUTE OF NUMERICAL ANALYSIS AND DESIGN OF STRUCTURES; **Steel-Concrete Composite Structures**. Disponível em <http://inp.grf.bg.ac.rs/en/project/steel-concrete_composite_structures/> Acesso em: 18 de outubro de 2023.

TUTIKIAN, BERNARDO; **A história do Concreto**. Disponível em <<https://bernardotutikian.com.br/a-historia-do-concreto/>> Acesso em: 03 de outubro de 2023.

PAUL, ANAND; **Composite Construction of Buildings – Composite Beams**. Disponível em <<https://civildigital.com/composite-construction-buildings-composite-beams/>> Acesso em: 18 de outubro de 2023.

GASPAR, MARÍLIA; **Steel Deck – Confira o Passo a Passo e Dicas de Utilização!** Disponível em <<https://www.sienge.com.br/blog/steel-deck/>> Acesso em: 03 de outubro de 2023.

Escola de Engenharia de São Carlos. **Viga Mista 3.0**. Disponível em: <<https://set.eesc.usp.br/software/vigamista/>>. Acesso em: 18 de outubro de 2023.

PAULA JUNIOR, EDUARDO; **Projeto de estruturas mistas de aço e concreto**. Minas Gerais: UFMG, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323: **Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200: **Projetos de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5628: **Componentes construtivos estruturais — Ensaio de resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2023.

LAGES, ANDRESSA; **Cálculo de flecha em viga pelo método da linha elástica**. Disponível em <<https://www.guiadaengenharia.com/flecha-viga-linha-elastica/>> Acesso em: 18 de outubro de 2023.

SOUZA, LUIZ; **Flambagem lateral com torção de vigas de aço em regime elasto-plástico**. Minas Gerais: UFMG, 1999.

BEZERRA, EDUARDO; **Determinação do Momento Fletor Resistente à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço Casteladas**. Minas Gerais: UFMG, 2011.

SOUZA, DANIEL; **Estudo da flambagem local da mesa de perfis I com alma senoidal via análise não-linear pelo MEF**. Minas Gerais: UFMG, 2006.

ROSSI, A. **Flambagem lateral com torção e distorção da alma em vigas de perfis I metálicos duplamente simétricos**. Universidade Estadual de Maringá, UEM, 2018.

SILVA, C. C. **Estudo da Influência da Distorção da Alma no Momento Crítico Elástico de Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço de Alma Não Esbelta com Seção I**. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte, 2017.

EUROPER; **Servicio instalacion conector stud en obra**. Disponível em <<https://europer.cl/servicio-instalacion-conector-stud-en-obra/>>. Acesso em: 18 de outubro de 2023.

MURRAY, T.M.; ALLEN D.E. & UNGAR, E. E. (1997). **Floor vibrations due to human activity. Steel design guide series 11**, American Institute of Steel Construction, Chicago; Canadian Institute of Steel Construction, Toronto.

AZEVEDO, MACKSUEL; MURAKAMI, ALMIR; SILVA, VALDIR; **Segurança das estruturas de aço externas a edificações em situação de incêndio**. Ouro Preto: R. Esc. Minas, 2007.

SILVA, VALDIR; VARGAS, MAURI; **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Rio de Janeiro: Instituto brasileiro de siderurgia, 2005.

MARTELO, MATHEUS; **Automatização do cálculo da elevação de temperatura em perfis de aço em situação de incêndio via métodos simplificados**. Campo Mourão: UTFPR, 2016.

FRUCHTGARTEN, J; **Cálculo de vigas mistas de aço e concreto**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2010.

CARDOSO, DANIEL; **Soluções em vigas mistas aço-concreto para projeto da superestrutura de pontes rodoviárias**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.

FÁBRICA DO PROJETO; **Tabelas de Laminados, Trefilados e Itens Comerciais**. Disponível em <<https://www.fabricadoprojeto.com.br/tabelas-de-laminados-trefilados-e-itens-comerciais/>>. Acesso em: 18 de outubro de 2023.

GOOGLE; **Flutter Documentation**. Disponível em <<https://docs.flutter.dev/>>. Acesso em: 18 de outubro de 2023.

GOOGLE; **Dart Documentation**. Disponível em <<https://dart.dev/guides/>>. Acesso em: 18 de outubro de 2023.

7 APÊNDICES

APÊNDICE A – Relatório do VMB Studio para Exemplo 1

RELATÓRIO: R1

1 - Dados de entrada

1.1 - Componente de aço

Mesa superior

Largura (mm) = 200.0

Espessura (mm) = 12.5

Mesa inferior

Largura (mm) = 200.0

Espessura (mm) = 12.5

Alma

Altura (mm) = 425.0

Espessura (mm) = 6.3

Resistência ao escoamento

$f_y(\text{Mpa})=300.0$

1.2 - Laje de concreto

Laje maciça

$t_c(\text{mm})=120.0$ $b(\text{mm})=2500.0$

Resistência característica à compressão

$f_{ck}(\text{MPa})=25.0$

Peso específico

$\gamma(\text{KN/m}^3)=25.0$

1.3 - Construção

Tipo de construção

Escritório

Poucos componentes não estruturais no piso

Escoramento

Análise de construção não escorada

Solicitações

Msk antes do concreto atingir $0.75 f_{ck}$ (KNm)=100.0

Msd antes do concreto atingir $0.75 f_{ck}$ (KNm)=146.0

Msk após o concreto atingir $0.75 f_{ck}$ (KNm)=100.0

Msd após o concreto atingir $0.75 f_{ck}$ (KNm)=68.0

Comprimento destravado lateralmente

L_b (m)=6.0

Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme

$C_b=1.3$

1.4 - Análise de temperatura

Análise em temperatura ambiente e em situação de incêndio

Tempo requerido de resistência ao fogo

TRRF (min)=60

Intervalo de tempo para cálculo

Δt (s)=5.0

Proteção do perfil

Sem proteção contra incêndio

1.5 - Conectores de cisalhamento

Tipo de conector

Pino com Cabeça "Stud Bolts"

Diâmetro do conector

D (mm)=19.1

Limite de resistência à tração do aço do conector

fucs (MPa)=415.0

2 - Resultados para temperatura ambiente

2.1 - Propriedades geométricas avançadas do perfil de aço

Área (cm²)=76.78
 Módulo de resistência plástico Z_x (cm³)=1378.23
 Módulo de resistência elástico W_x (cm³)=1242.78
 Momento de inércia I_x (cm⁴)=27962.49
 Momento de inércia I_y (cm⁴)=1667.55
 Raio de giração r_x (cm)=19.08
 Raio de giração r_y (cm)=4.66
 Constante de torção J (cm³)=29.69
 C_w (cm⁶)=797949.81

2.2 - Tipo de análise para dimensionamento

Limite superior para análise plástica=97.08
 Limite superior para análise elástica=147.17
 λ=67.46
 Tipo de análise=Análise plástica

2.3 - Capacidades resistentes (Interação completa)

Momento fletor resistente de cálculo

M_d (KNm)=664.61

Conectores de cisalhamento

Resistência unitária de um conector (KN)=88.40
 Resistência mínima dos conectores (KN)=2093.86
 Número de conectores em meia viga=24

Tensões atuantes

Tensão de tração (MPa)=126.64
 Tensão de compressão (MPa)=2.17

Linha neutra (a partir de topo da viga de aço, sentido positivo para baixo)

y (mm)=-64.82

2.4 - Capacidades resistentes (Interação parcial)

Grau de interação

Grau de interação mínimo (%)=55.02
 Interação adotada (%)=59.11

Momento fletor resistente de cálculo

M_d (KNm)=596.10

Conectores de cisalhamento

Resistência unitária de um conector (KN)=88.40
 Resistência mínima dos conectores (KN)=1151.99
 Número de conectores em meia viga=14

Tensões atuantes

Tensão de tração (MPa)=134.89
 Tensão de compressão (MPa)=2.17

2.5 - Homogeneização da seção mista

Razão modular

$$E/E_c=25.21$$

Alavanca de tração

$$y_{tr} \text{ (cm)}=39.82$$

Módulo de resistência elástica inferior

$$W_{tri} \text{ (cm}^3\text{)}=1689.85$$

Módulo de resistência elástica superior

$$W_{trs} \text{ (cm}^3\text{)}=3917.89$$

Momento de inércia em torno do eixo horizontal

$$I_{tr} \text{ (cm}^4\text{)}=67295.73$$

Momento de inércia efetivo

$$I_{ef} \text{ (cm}^4\text{)}=58202.86$$

Módulo de resistência elástica inferior efetivo

$$W_{ef} \text{ (cm}^3\text{)}=1586.50$$

2.6 - Verificação ao esforço cortante

Área efetiva de cisalhamento

$$A_w \text{ (cm}^2\text{)}=28.35$$

Força cortante correspondente à plastificação da alma

$$V_{pl} \text{ (kN)}=510.30$$

Força cortante de cálculo

$$V_{rd} \text{ (kN)}=436.73$$

2.7 - Verificação como viga de aço isolada

Momento de plastificação

$$M_{pl} \text{ (kNm)}=413.47$$

Flambagem local da alma

$$\text{Momento Resistente de Cálculo (kNm)}=375.88$$

Flambagem local da mesa

$$\text{Momento Resistente de Cálculo (kNm)}=375.88$$

Flambagem lateral com torção

$$\text{Momento Resistente de Cálculo (kNm)}=291.65$$

Momento resistente de cálculo (menor dos três ELUs)

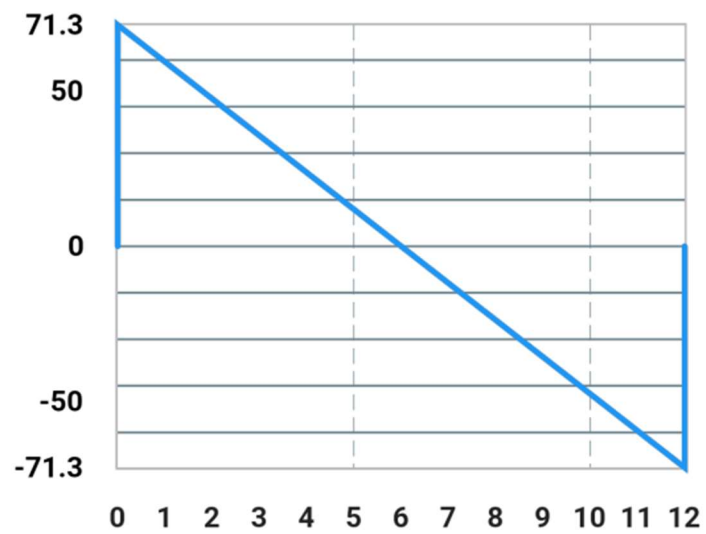
$$M_{rd} \text{ (kNm)}=291.65$$

2.8 - Limite de tensões na mesa inferior

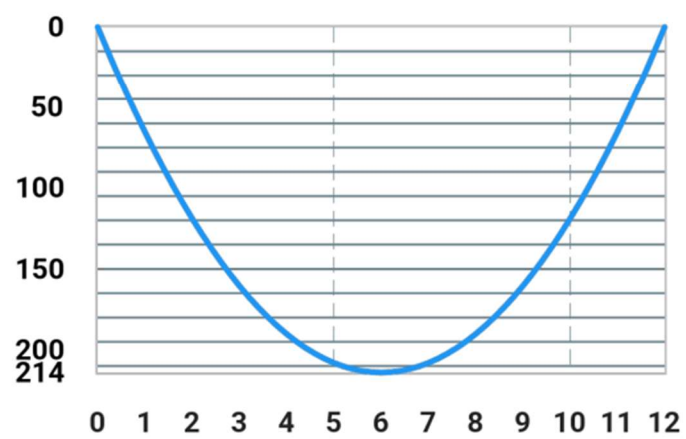
$$M_{Gasd}/W_a + M_{Lsd}/W_{ef} \text{ (MPa)}=160.34$$

2.9 - Diagramas de Esforços Solicitantes

2.9.1 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC)



2.9.2 - Diagrama de Momento Fletor (DMF)



2.10 - Deflexão da viga

Posição (m)	Deslocamento (mm)
0.0	0.00
1.2	15.04
2.4	28.46
3.6	38.97
4.8	45.64
6.0	47.92
7.2	45.64
8.4	38.97
9.6	28.46
11	15.04
12	0.00

2.11 - Vibração da estrutura**Frequência natural** f_n (Hz)=2.57

3 - Resultados para situação de incêndio

3.1 - Laje de concreto

Altura efetiva da laje

$H_{ef} \text{ (mm)} = 120.0$

Temperatura na Laje de Concreto

$\theta_c \text{ (}^\circ\text{C)} = 263.25$

Fator de redução K_c

$K_c = 0.89$

3.2 - Perfil de aço

3.2.1 - Fator de massividade

Mesa superior (m-1) = 90.00

Alma (m-1) = 322.17

Mesa inferior (m-1) = 170.00

3.2.2 - Fator de Correção para o Efeito de Sombreamento

$K_{sh} = 0.67$

3.2.3 - Temperatura nos componentes do perfil

Mesa superior (°C) = 933.32

Alma (°C) = 942.33

Mesa inferior (°C) = 939.45

3.2.4 - Fatores de redução (Limite de escoamento - K_y)

Mesa superior (K_{ys}) = 0.05

Mesa inferior (K_{yi}) = 0.05

3.2.5 - Fator de redução do módulo de elasticidade - K_e

$K_e = 0.06$

3.3 - Conectores de cisalhamento

Fator de redução K_c

$K_c = 0.78$

Fator de redução K_y

$K_y = 0.17$

3.4 - Capacidades resistentes (Interação completa)

Momento fletor resistente de cálculo

M_d (KNm)=41.41

Conectores de cisalhamento

Resistência mínima dos conectores (KN)=120.48

Linha neutra (a partir de topo da viga de aço, sentido positivo para baixo)

y (mm)=-117.44

APÊNDICE B – Roteiro de cálculo analítico para exemplo 1

B.1 Propriedades geométricas do perfil de aço

$$A_a = 42,6 * 0,63 + 2 * (20 * 1,5) = 76,78 \text{ cm}^2$$

$$I_x = \frac{0,63 * 42,5^3}{12} + 2 * \left(\frac{20 * 1,25^3}{12} + 21,875^2 * (1,25 * 20) \right) = 27962,49 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 2 * \frac{1,25 * 20^3}{12} + \frac{42,5 * 0,63^3}{12} = 1667,55 \text{ cm}^4$$

$$W_x = \frac{27962,49}{22,50} = 1242,78 \text{ cm}^3$$

$$Z_x = 20 * 1,25 * 43,75 + 0,25 * 0,63 * 42,5^2 = 1378,23 \text{ cm}^3$$

$$r_x = \sqrt{\frac{27962,49}{76,78}} = 19,08 \text{ cm}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{1667,55}{76,78}} = 4,66 \text{ cm}$$

$$J = \frac{2 * 20 * 1,25^3 + (42,5 + 1,25) * 0,63^3}{3} = 29,69 \text{ cm}^4$$

$$C_w = \frac{1667,55 * (42,5 - 1,25)}{4} = 797948,73 \text{ cm}^6$$

B.2 Tipo de análise

$$\frac{h}{tw} = \frac{42,5}{0,63} = 67,46$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{200000}{300}} = 97,08$$

$$\lambda_r = 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 5,7 \sqrt{\frac{200000}{300}} = 147,17$$

Como $\frac{h}{tw} < \lambda_p$, admite-se análise plástica.

B.3 Capacidade resistente (Interação completa)

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 25/1,4 = 17,857 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y/\gamma_{a1} = 300/1,1 = 272,727 \text{ MPa}$$

$$0,85 * f_{cd} * b * t_c = 0,85 * 17,857 * 2500 * 120 = 4553,535 \text{ KN}$$

$$A_a * f_{yd} = 7677,5 * 272,727 = 2093,862 \text{ KN}$$

Como $0,85 * f_{cd} * b * t_c > A_a * f_{yd}$, admite-se linha neutra plástica na laje de concreto.

$$T_{ad} = A_a * f_{yd} = 2093,862 \text{ KN}$$

$$a = \frac{T_{ad}}{0,85 * f_{cd} * b} = 0,05518 \text{ m} = 55,18 \text{ mm}$$

Linha neutra: $LNP = 120 - 55,18 = 64,82 \text{ mm}$, considerando LNP a partir de topo da viga de aço com sentido positivo para cima.

$$M_{Rd} = \beta_{vm} T_{ad} (d_1 + h_f + t_c - \frac{a}{2}) = 1 * 2093,862 * (225 + 120 - 55,18/2)$$

$$M_{Rd} = 664612,737 \text{ KNmm} = 664,61 \text{ KNm}$$

Resistência individual do conector de cisalhamento:

$$Q_{RD1} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} = \frac{1}{2} \frac{\pi * (19,1)^2}{4} \frac{\sqrt{25 * (0,85 * 5600 * \sqrt{25})}}{1,25} = 88404,61 \text{ KN}$$

$$= 88,40 \text{ KN}$$

$$Q_{RD2} = \frac{R_g * R_p * A_{cs} * f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = \frac{1 * 1 * 286,521 * 415}{1,25} = 118906,215 \text{ KN} = 118,91 \text{ KN}$$

Então $Q_{RD} = 88,40 \text{ KN}$.

Como $F_{hd} = A_a * f_{yd} = 2093,862 \text{ KN}$, o número de conectores a meia viga é:

$$n = \text{número inteiro imediatamente superior a } \frac{2093,862}{88,40} = 24$$

B.4 Capacidade resistente (Interação parcial)

Grau de interação mínima:

$$\eta_i = 1 - \frac{E}{578 * f_y} * (0,75 - 0,03 * L_e) = 1 - \frac{200000}{578 * 300} * (0,75 - 0,03 * 12) = 0,5502$$

Resistência mínima dos conectores:

$$F_{hd} = \eta_i * A_a * f_{yd} = 0,5502 * 2093,862 = 1152,04 \text{ KN}$$

Número de conectores:

$$n = \text{número inteiro imediatamente superior a } \frac{1152,04}{88,40} = 14$$

Grau de interação adotado:

$$\eta_i = 14 * \frac{88,40}{2093,862} = 0,59106$$

Momento fletor resistente de cálculo:

$$C_{cd} = 12093,862 * 0,59106 = 1237,68 \text{ KN}$$

$$C_{ad} = \frac{1}{2}(2093,862 - 1237,68) = 428,091 \text{ KN}$$

$$A_{af} * f_{yd} = \frac{200 * 12,5 * 300}{1,1} * 10^{-3} = 681,82 \text{ KN} > C_{ad} , \text{ então:}$$

$$y_p = \frac{428,091}{681,82} * 12,5 = 7,85 \text{ mm}$$

$$y_c = \frac{7,85}{2} = 3,925 \text{ mm}$$

$$y_t = 450 - \frac{(900 * 10,175 + 2667,5 * 225,25 + 2500 * 443,75)}{6077,5} = 167,09 \text{ mm}$$

$$a = \frac{1237,68}{0,85 * 25 / 1,4 * 200} = 0,40771 \text{ m} = 407,71 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = 1[428,091 * (450 - 167,09 - 3,925) + 1237,68 * (120 - 203,85 + 450 - 167,09)]$$

$$M_{Rd} = 592864,51 \text{ Nm} = 592,86 \text{ KNm}$$

B.5 Homogeneização da seção mista

$$\alpha_E = E/E_c = 200000 / (0,85 * 5600 * \sqrt{25}) = 8,403$$

Considerando efeitos de longa duração (fluência e retração do concreto), multiplica-se α_E por 3.

$$\alpha_E = 3 * 8,403 = 25,21$$

$$b_{tr} = b / \alpha_E = 2500 / 25,21 = 99,17 \text{ mm}$$

$$A_c' = 99,17 * 120 = 11900,4 \text{ mm}^2$$

$$A_a = 7677,5 \text{ mm}^2$$

$$y_a = 450 / 2 = 225 \text{ mm}$$

$$y_{tr,i} = \frac{7677,5 * 225 + 11900,4 * (450 + 0 + 60)}{7677,5 + 11900,4} = 398,23 \text{ mm}$$

Como $y_{tr,i} < d$, tem-se:

$$I_{tr} = 279624900 + 7677,5 * (398,23 - 225)^2 + \frac{99,17 * 120^3}{12} + 11900 * (450 + 60 - 398,23)^2$$

$$I_{tr} = 672962797,61 \text{ mm}^4 = 67296,28 \text{ cm}^4$$

$$W_{tri} = 67296,28 / 39,82 = 1690,01 \text{ cm}^3$$

$$W_{trs} = 67296,28 / (45 + 0 + 12 - 39,82) = 3917,13 \text{ cm}^3$$

$$W_{ef} = 1242,78 + \sqrt{0,5911}(1690,01 - 1242,78) = 1586,62 \text{ cm}^3$$

$$I_{ef} = 27962,49 + \sqrt{0,5911}(67296,28 - 27962,49) = 58203,50 \text{ cm}^4$$

B.6 Tensões atuantes

$$M_{sd} = 214 \text{ KNm}$$

- Interação completa:

$$\sigma_{td} = \frac{214 * 10^3}{1690 * 10^{-6}} = 126,63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cd} = \frac{214 * 10^3}{25,21 * 3917,13 * 10^{-6}} = 2,17 \text{ MPa}$$

- Interação parcial:

$$\sigma_{td} = \frac{214 * 10^3}{1586,62 * 10^{-6}} = 134,88 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cd} = \frac{214 * 10^3}{25,21 * 3917,13 * 10^{-6}} = 2,17 \text{ MPa}$$

B.7 Verificação ao esforço cortante

$$A_w = 450 * 6,3 = 2835 \text{ mm}^2 = 28,35 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl} = 0,60 * 28,35 * 10^2 * 300 = 510300 \text{ N} = 510,30 \text{ kN}$$

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{425}{6,3} = 67,46$$

$$\lambda_p = 1,10 * \sqrt{\frac{5 * 200000}{300}} = 63,51$$

$$\lambda_r = 1,37 * \sqrt{\frac{5 * 200000}{300}} = 79,097$$

Dessa forma:

$$V_{Rd} = \frac{63,51}{67,46} * \frac{510,30}{1,1} = 436,75 \text{ KN}$$

B.8 Verificação de estados-limite da viga de aço isolada

$$M_{pl} = 1378,21 * 300 = 413469 \text{ Nm} = 413,47 \text{ KNm}$$

- FLA:

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{425}{6,3} = 67,46$$

$$\lambda_p = 3,76 * \sqrt{\frac{5 * 200000}{300}} = 97,08$$

$$M_{Rd} = \frac{413,47}{1,1} = 375,88 \text{ KNm}$$

- FLM:

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{100}{12,5} = 8$$

$$\lambda_p = 0,38 * \sqrt{\frac{200000}{300}} = 9,81$$

$$M_{Rd} = \frac{413,47}{1,1} = 375,88 \text{ KNm}$$

- FLT:

$$\lambda = \frac{600}{4,66} = 128,76$$

$$\lambda_p = 1,76 * \sqrt{\frac{200000}{300}} = 45,44$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 * \sqrt{1667,55 * 29,69}}{4,66 * 29,69 * 0,044} * \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 * 0,044^2 * 797948,73}{1667,55}}} = 124,59$$

$$M_{cr} = \frac{1,3 * \pi^2 * 200000 * 1667,55}{600^2} * \sqrt{\frac{797948,73}{1667,55} * (1 + 0,039 * \frac{29,39 * 600^2}{797948,73})}$$

$$M_{cr} = 320548,46 \text{ Nm} = 320,55 \text{ KNm}$$

$$M_{Rd} = \frac{320,55}{1,1} = 291,41 \text{ KNm}$$

B.9 Limitação de tensões nas fibras inferiores

$$\sigma = \frac{146}{1242,78 * 10^{-3}} + \frac{68}{1586,62 * 10^{-3}} = 117,4786 + 42,8584 = 160,34 \text{ MPa}$$

B.10 Flecha máxima

$$q_1 = 4 * 146/12 * 2/12 = 8,11 \text{ KN/m}$$

$$q_2 = 4 * 68/12 * 2/12 = 3,78 \text{ KN/m}$$

$$\delta_1 = \frac{5 * 8,11 * 12^4}{384 * 200000 * 279624900 * 10^{-6}} = 3,915 * 10^{-5} \text{ km} = 39,15 \text{ mm}$$

$$\delta_2 = \frac{5 * 3,78 * 12^4}{384 * 200000 * 582035000 * 10^{-6}} = 8,767 * 10^{-6} \text{ km} = 8,767 \text{ mm}$$

$$\delta_{tot} = 39,15 + 8,767 = 47,92 \text{ mm}$$

B.11 Frequência natural da estrutura

$$f_n = 0,18 * \sqrt{\frac{g}{\delta_{tot}}} = 0,18 * \sqrt{\frac{9,81}{47,92 * 10^{-3}}} = 2,58 \text{ Hz}$$

B.12 Fatores de massividade

Para a mesa superior do perfil de aço:

$$\frac{u}{A_g} = \frac{20 + 2 * 1,25}{20 * 1,25} = 0,9 \text{ cm}^{-1} = 90 \text{ m}^{-1}$$

Para a mesa inferior do perfil de aço:

$$\frac{u}{A_g} = \frac{2 * (20 + 1,25)}{20 * 1,25} = 1,7 \text{ cm}^{-1} = 170 \text{ m}^{-1}$$

Para a alma do perfil de aço:

$$\frac{u}{A_g} = \frac{2 * (42,5 + 0,63)}{42,5 * 0,63} = 3,22166 \text{ cm}^{-1} = 322,17 \text{ m}^{-1}$$

B.13 Capacidade resistente em situação de incêndio (Interação completa)

$$k_{y,\theta \text{ mesa sup.}} = 0,05$$

$$k_{y,\theta \text{ alma}} = 0,05$$

$$k_{y,\theta \text{ mesa inf.}} = 0,05$$

$$f_{cd} = f_{ck} * k_c = 25 * 0,89 = 22,25 \text{ MPa}$$

$$A_{\text{mesa s.}} * f_y * k_{y,\theta \text{ mesa sup.}} + A_{\text{alma}} * f_y * k_{y,\theta \text{ alma}} + A_{\text{mesa inf.}} * f_y * k_{y,\theta \text{ mesa inf.}} = 120,48 \text{ KN}$$

$$0,85 * f_{cd} * b * t_c = 0,85 * 22,5 * 2500 * 120 = 5673,75 \text{ KN}$$

Como $5673,75 \text{ KN} > 120,48 \text{ KN}$, admite-se linha neutra plástica na laje de concreto.

$$T_{ad} = A_{\text{mesa s.}} * f_y * k_{y,\theta \text{ mesa sup.}} + A_{\text{alma}} * f_y * k_{y,\theta \text{ alma}} + A_{\text{mesa inf.}} * f_y * k_{y,\theta \text{ mesa inf.}}$$

$$T_{ad} = 120,48 \text{ KN}$$

$$a = \frac{T_{ad}}{0,85 * f_{cd} * b} = 0,00255 \text{ m} = 2,55 \text{ mm}$$

Linha neutra: $LNP = 120 - 2,55 = 117,45 \text{ mm}$, considerando LNP a partir de topo da viga de aço com sentido positivo para cima.

$$M_{Rd} = \beta_{vm} T_{ad} (d_1 + h_f + t_c - \frac{a}{2}) = 1 * 120,48 * (225 + 120 - 2,55/2)$$

$$M_{Rd} = 41411,988 \text{ KN mm} = 41,41 \text{ KNm}$$

APÊNDICE C – Relatório do Viga Mista 3.0 para Exemplo 1

Viga Mista vs3.0
Principal Resultados Cadastro Ajuda

Ident **Mat**

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa
 Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 664.61
 Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 2093.86
 Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 24.00
 Posição da Linha Neutra y [mm] = -64.82
 OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço
 Positivo para baixo
 Tensão de tração [kN/cm²] = 4.18
 Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.05

Interação Parcial
 Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 555.15
 Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 837.55
 Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 10.00
 Tensão de tração [kN/cm²] = 8.84
 Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.25
 OBS: grau de interação mínimo é de [%] = 40.00

Força Cortante (sem reforçadores)
 Cortante Resistente de Cálculo [kN] = 412.47

Verificação como viga de aço isolada
 Momento Resistente de Cálculo - FLA [kN.m] = 375.88
 Momento Resistente de Cálculo - FLM [kN.m] = 375.88
 Momento Resistente de Cálculo - FLT [kN.m] = 294.20
 Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 294.20

Limitação de Tensões
 MG/WA + ML/Wef [kN/cm²] = 14.53

Resultados para Situação de Incêndio - de acordo com o projeto de revisão da NBR 14323:2010

Laje de concreto
 Hef [mm] = 120.00
 Temperatura na Laje de Concreto [°C] = 263.25

Perfil de aço
 Fator de Massividade da Mesa Superior [m-1] = 90.00
 Fator de Massividade da Alma [m-1] = 322.17
 Fator de Massividade da Mesa Inferior [m-1] = 170.00
 Fator de Correção para o Efeito de Sombreamento (Ksh) = 0.66
 Temperatura na Mesa Superior [°C] = 933.70
 Temperatura na Alma [°C] = 942.73

Viga Mista vs3.0
Principal Resultados Cadastro Ajuda

Ident **Mat**

Momento Resistente de Cálculo - FLT [kN.m] = 294.20
 Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 294.20

Limitação de Tensões
 MG/WA + ML/Wef [kN/cm²] = 14.53

Resultados para Situação de Incêndio - de acordo com o projeto de revisão da NBR 14323:2010

Laje de concreto
 Hef [mm] = 120.00
 Temperatura na Laje de Concreto [°C] = 263.25

Perfil de aço
 Fator de Massividade da Mesa Superior [m-1] = 90.00
 Fator de Massividade da Alma [m-1] = 322.17
 Fator de Massividade da Mesa Inferior [m-1] = 170.00
 Fator de Correção para o Efeito de Sombreamento (Ksh) = 0.66
 Temperatura na Mesa Superior [°C] = 933.70
 Temperatura na Alma [°C] = 942.73
 Temperatura na Mesa Inferior [°C] = 939.85

Fatores de Redução
 Referente ao limite de escoamento da mesa superior da viga de aço - Kys = 0.05
 Referente ao limite de escoamento da mesa inferior da viga de aço - Kyi = 0.05
 Referente ao módulo de elasticidade da alma da viga de aço - Ke = 0.06
 Referente à resistência característica à compressão do concreto - Kc = 0.87
 Referente à resistência característica à compressão do concreto (cálculo dos conectores) - Kc = 0.78
 Referente à resistência à tração do aço do conector - Ky = 0.17

Interação Completa
 Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 41.35
 Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 120.30
 Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 24.00
 Posição da Linha Neutra y [mm] = -117.39
 OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço
 Positivo para baixo

Interação Parcial
 Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 32.19
 Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 48.12
 Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 10.00
 OBS: grau de interação mínimo é de [%] = 40.00

Força Cortante (sem reforçadores)
 Cortante Resistente de Cálculo [kN] = 25.14

APÊNDICE D – Potencial divergência no Viga Mista 3.0 para grau de interação mínimo

Vina Mistra v3.0
Entrada de Dados - Geometria

Perfil de aço

☒ Perfil soldado ☐ Perfil laminado

Perfis Disponíveis: VS 450 x 60

Perfil VS 450 x 60

Mesa Superior

bf [mm] 200 tf [mm] 12.5

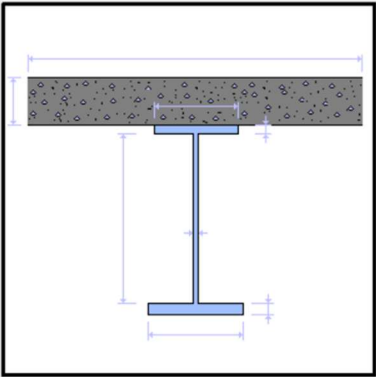
Mesa Inferior

bf [mm] 200 tf [mm] 12.5

Alma

hw [mm] 425 tw [mm] 6.3

d' [mm]



Comprimento total da viga de aço

Le [m] 25

Laje de concreto

☒ Laje maciça
☐ Laje com forma de aço incorporada, com nervuras paralelas à viga
☐ Laje com forma de aço incorporada, com nervuras perpendiculares à viga

tc [mm] 120 b [mm] 2500 ?

Laje com forma de aço incorporada

Dados necessários para o cálculo da altura efetiva da laje

L1 [mm] L2 [mm] L3 [mm]

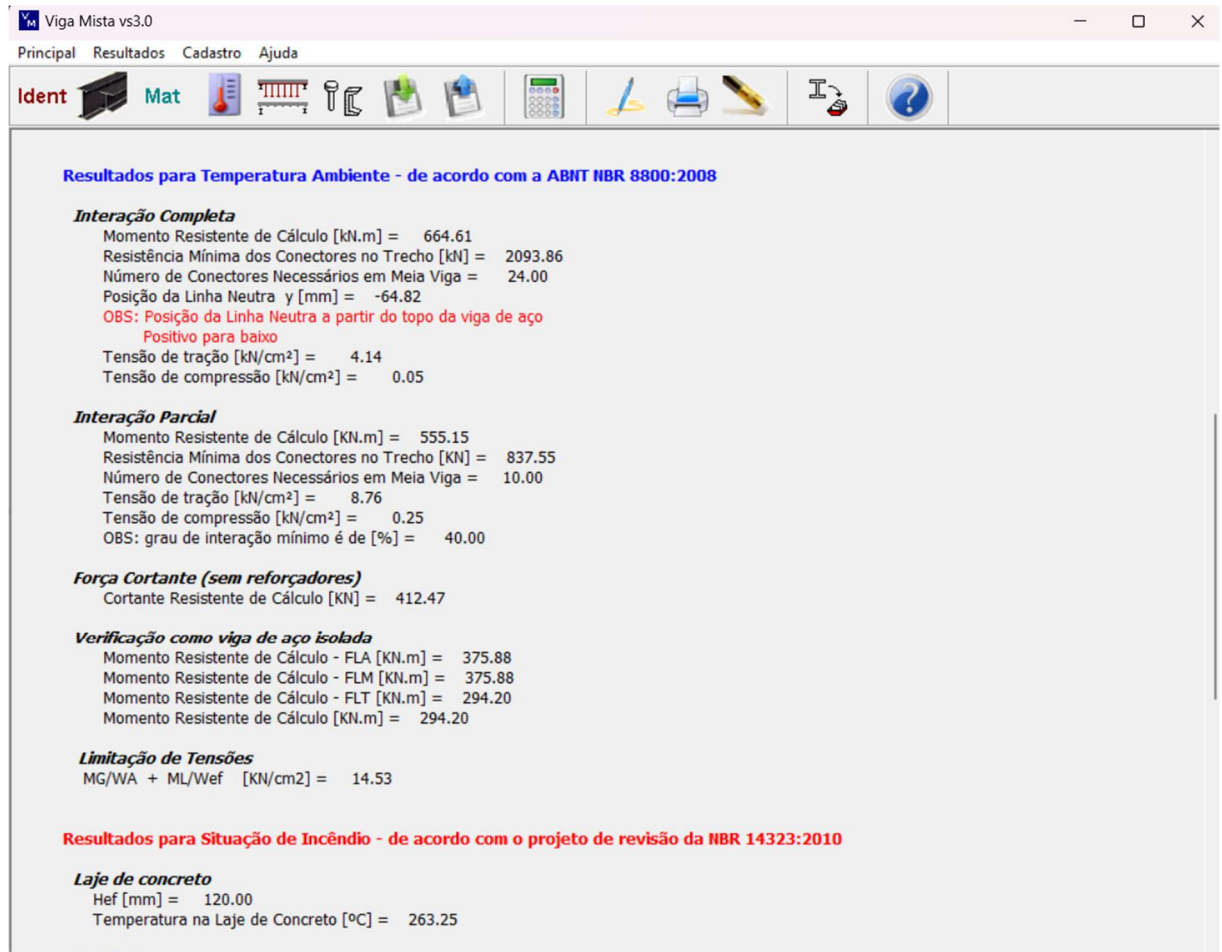
h1 [mm] h2 [mm]

Dimensões Limites



Cancelar OK

Laje de concreto
Hef [mm] = 120.00
Temperatura na Laje de Concreto [°C] = 263.25



APÊNDICE E – Potencial divergência no Viga Mista 3.0 para força cortante de cálculo, alteração no código-fonte do VMB Studio e da força cortante de plastificação da alma por cisalhamento

```
static double getVpl(Geometry geometry, double fy) {
    // var d = geometry.hwSoul + geometry.tfInf + geometry.tfSup;
    var d = geometry.hwSoul;
    var tw = geometry.twSoul;
    var Aw = d * tw;
    return 0.60 * Aw * fy;
}
```

