



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

**LAYS RAIANNE AZEVEDO DA COSTA**

**DESENVOLVIMENTO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA  
AUXÍLIO NA ANÁLISE DE DECISÃO SOBRE O TIPO DE  
ESTRUTURA: AÇO, MADEIRA OU CONCRETO ARMADO**

João Pessoa – PB

Novembro de 2017

**LAYS RAIANNE AZEVEDO DA COSTA**

**DESENVOLVIMENTO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA  
AUXÍLIO NA ANÁLISE DE DECISÃO SOBRE O TIPO DE  
ESTRUTURA: AÇO, MADEIRA OU CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheira civil.

Prof. Dr<sup>o</sup>. Hidelbrando José Farkat Diógenes

João Pessoa – PB

Novembro de 2017

C837d Costa, Lays Raianne Azevedo da

Desenvolvimento de código computacional para auxílio na análise de decisão sobre o tipo de estrutura: aço, madeira ou concreto armado./ Lays Raianne Azevedo da Costa. – João Pessoa, 2017.

101f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Concreto Armado 2. Madeira 3. Aço 4. Visual Basic 5. Comparativo.

BS/CT/UFPB

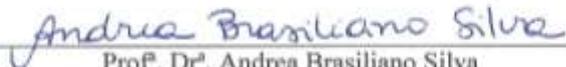
CDU: 2.ed. 624:504(043)

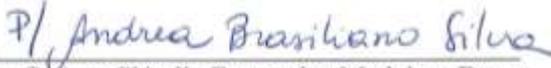
**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**LAYS RAIANNE AZEVEDO DA COSTA**

**DESENVOLVIMENTO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO NA  
ANÁLISE DE DECISÃO SOBRE O TIPO DE ESTRUTURA: AÇO, MADEIRA OU  
CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso em 24/11/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

 _____ Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB	<u>Aprovada</u>
 _____ Prof. Dr. Andrea Brasiliano Silva Departamento de Engenharia Civil e Ambiental CT/UFPB	<u>Aprovada</u>
 _____ Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB	<u>APROVADA</u>

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga  
Matrícula Siape: 1668619  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos amores da minha vida e a todos  
aqueles que sempre me fizeram mais forte.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, preciso agradecer a Deus, porque foi ele que me fortaleceu continuamente, me alimentou diariamente com o seu amor infinito e me permitiu chegar até aqui. Toda a honra e glória a ti, Senhor!

Aos meus pais, Carlos e Luciane, por terem me dado todo o apoio necessário, por terem sido o meu porto seguro, estarem comigo em todos os momentos de dúvidas, por terem me ajudado a fazer as escolhas certas e por terem financiado todos os meus sonhos! Esta conquista também é de vocês.

Ao meu irmão Luciano, por todo o exemplo, amizade, ajuda, compreensão, conselho e por todas as vezes em que esteve comigo, me mostrando que apesar de todos os problemas surgidos, eu seria capaz de chegar onde quisesse. Obrigada por sempre ter encurtado toda e qualquer distância.

Ao meu namorado, Carlos Augusto, por ter me dado todo o amor, compreensão e apoio necessário. Obrigada por toda a paciência e pelo interesse em participar constantemente da minha vida e todas as minhas conquistas.

Ao professor Hidelbrando e professora Andrea, meus orientadores. Por toda a paciência, ensinamentos compartilhados e por terem sido além de mestres, grandes amigos.

A toda a minha família, por terem compreendido todas as minhas ausências e serem sempre o maior alicerce para a edificação do meu castelo. Sem vocês, tudo teria sido mais difícil.

Aos meus amigos, pelo cuidado de sempre, pela compreensão e por terem rido e chorado junto comigo.

Aos meus colegas de curso, em especial a Anne Monteiro, Brenda Falcone, Luci Lucena, Arthur Brito, Diego Amorim, Arthur Coutinho, Guilherme Álef, Reginaldo Brasil, Renan Martins, Gabriel Soares, Pedro Egídio, Fabio Mariz, Kildenberg e Francisco Eli, amigos de todas as horas, por todas as histórias compartilhadas e pelos anos de aprendizado, incentivo e conquistas.

A todos os professores da UFPB que contribuíram diretamente com a minha formação. Obrigada por terem ajudado a construir toda a base necessária para o desempenho da profissão escolhida, a engenharia.

Ao professor Sarmiento por ter fornecido toda a base de programação, necessária para o desenvolvimento deste trabalho e por ter se mostrado disponível em todos os momentos em que precisei.

Ao professor Enildo, pelos primeiros ensinamentos relacionados ao concreto armado e pela sua contribuição como docente desta instituição.

A todos os técnicos e servidores da UFPB, pela gentileza de sempre.

A professora Ana Cláudia, coordenadora do curso de Engenharia Civil, por ser além de professora e coordenadora, grande amiga de todos os alunos.

Aos colegas da Suplan, pelas oportunidades.

Enfim, gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho e que permitiram que esta caminhada se tornasse a mais leve possível. Terminar esta jornada sem demonstrar toda a gratidão que sinto seria muito injusto de minha parte. A colaboração de vocês foi essencial. A todos, muito obrigada.

## RESUMO

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil, graças as suas vantagens de facilidade de moldagem e características estruturais, mas apresenta desvantagens ligadas ao peso das construções e de dificuldades na realização de reformas. Neste sentido, é necessário que se tenha conhecimento acerca das propriedades de outros materiais construtivos, como aço e madeira, e que se possa comparar em termos financeiros e estruturais o desempenho de tais materiais com o do concreto. Com esse trabalho buscou-se fazer um comparativo acerca do dimensionamento de vigas utilizando os três materiais citados, a partir do desenvolvimento de um *software* na linguagem de programação *Visual Basic*. Os resultados obtidos pelo programa foram validados e este mostrou-se como uma ferramenta viável de dimensionamento, podendo, pois, ser utilizado para a análise desejada. O estudo foi feito a partir da adoção de parâmetros fixos de cálculo para os três materiais, com variação apenas do comprimento de vão da viga e da altura da mesma para as seções de concreto, que foi definida a partir das condições de pré-dimensionamento definidas em norma. Ao final, constatou-se que para pequenos vãos de viga, até 5 metros, praticamente não houve variação nos valores encontrados para os materiais, ainda que as vigas de aço tenham se apresentado como mais vantajosas. Entre 6 e 8 metros houve variação quanto à viabilidade dos materiais. Acima deste intervalo foi constatada a vantagem do emprego das vigas de concreto, apenas quando consideramos o custo, pois no que se refere ao aspecto altura e peso dos materiais, as vigas de aço se apresentaram como mais vantajosas. Porém, a análise feita considerou parâmetros isolados e estudos adicionais a respeito do tempo de execução de obras, custo de sistemas construtivos integrados, gastos com manutenção dos materiais, propriedades resistentes, etc., são necessários, a fim de se obter um parâmetro ótimo de dimensionamento e a adoção do sistema construtivo que atende perfeitamente às exigências da obra a qual será destinado.

Palavras –chave: Concreto, Madeira, Aço, Madeira, *Visual Basic*, comparativo

## **ABSTRACT**

Concrete is a material widely used in construction, due to its advantages of easily molding and structural features, but it has disadvantages linked to the weight of the constructions and the difficulty in realizing reform. In this sense, it is necessary the knowledge about the properties of other building materials, such as steel and wood, which performances can be compared in financial and structural terms with concrete. In this work, the main was compare the sizing, using the three materials mentioned, from the development of a software and adoption the Visual Basic programming language. The results obtained by the program were validated and this proved to be a viable sizing tool and could therefore be used for desired analysis. The study was made from the adoption of fixed calculation parameters for the three materials, with variation only of beam length and its height for concrete sections, defined from beam length. At the end, for small spans, it was not almost found important differences between three materials, until 5 meters, even though steel beams has shown better results. Between 6 and 8 meters it could be seen variability between three materials. After that, concrete beams seems to be more advantageous, only about cost parameter, because steel beams seems to be more advantageous about height and weight parameter. But the analysis made considered isolated parameters and studies concerning the execution times of buildings, cost of integrated construction systems , maintenance of materials, resistant properties, etc., must be developed, to achieve the best parameter and adoption the construction system, that fits the requirements of each construction.

**Keywords:** Concrete, Wood, Steel, Visual Basic, comparison.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Binário de tensões aço-concreto. ....	21
Figura 2. Diagrama simplificado tensões do concreto. ....	22
Figura 3. Dimensionamento de armadura com armadura dupla.....	25
Figura 4. Gancho dos estribos.....	30
Figura 5. Página inicial do Concremaço® .....	55
Figura 6. Aba cargas .....	56
Figura 7. Mensagem de advertência para o preenchimento de informações.....	57
Figura 8. Aba Concreto Armado .....	58
Figura 9. Aba Aço .....	59
Figura 10. Aba Madeira .....	60
Figura 11. Página Aba Resultados .....	62
Figura 12. Mensagem de advertência para a escolha das bitolas .....	62
Figura 13. Aba Detalhamento .....	63
Figura 14. Exemplo de funcionamento do Concremaço® .....	65
Figura 15. Comparativo de custos apresentados pelo Concremaço®, diante do dimensionamento dos materiais .....	70
Figura 16. Comparativo entre as alturas de vigas obtidas após o dimensionamento pelo Concremaço® .....	71
Figura 17. Comparativo entre os pesos obtidos para os materiais estruturais após o dimensionamento pelo Concremaço® .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Profundidade da linha neutra.....	23
Tabela 2. Comparativo entre os materiais para os custos apresentados pelo Concremaço® .....	69
Tabela 3. Comparativo entre as alturas de vigas obtidas após o dimensionamento pelo Concremaço® .....	70
Tabela 4. Comparativo entre os pesos obtidas para os materiais estruturais após o dimensionamento pelo Concremaço® .....	71

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Dimensões gancho estribos .....	30
Quadro 2. Constantes físicas do aço para projeto .....	32
Quadro 3. Características geométricas da seção I.....	32
Quadro 4. Classes de carregamento .....	43
Quadro 5. Valores do coeficiente de ajuste $k_{mod1}$ .....	43
Quadro 6. Classes de Umidade .....	43
Quadro 7. Valores do coeficiente $k_{mod2}$ .....	43
Quadro 8. Valores do Coeficiente $k_{mod3}$ .....	44
Quadro 9. Valores para os coeficientes de minoração .....	44

## ANEXOS

Quadro A 1. Classes de agressividade ambiental (CAA).....	78
Quadro A 2. Correspondências entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal = 10 mm. ....	78
Quadro A 3. Fatores de combinação no estado limite último para concreto.....	79
Quadro A 4. Coeficientes parciais para ações permanentes e acidentais para concreto .....	79
Quadro A 5. Coeficientes parciais para efeitos de recalques de apoio e de retração para concreto.....	79
Quadro A 6. Coeficientes Parciais $\gamma_c$ e $\gamma_s$ para concreto.....	80
Quadro A 7. Coeficiente de segurança parciais aplicados às ações no Estado limite último para perfis metálicos .....	80
Quadro A 8. Valores de fatores de combinação e de redução para as ações variáveis para perfis metálicos .....	81
Quadro A 9. Valores do coeficiente Parcial de segurança. Aplicado às resistências para perfis metálicos .....	81
Quadro A 10. Coeficiente de majoração das ações no estado limite de projeto para madeira.....	82
Quadro A 11. Fatores de combinação e redução para madeira .....	82
Quadro A 12. Espécies de Madeira e características estruturais .....	83
Quadro A 13. Dimensões comerciais para peças de madeira estrutural.....	84
Quadro A 14. Fatores de redução para o aço .....	84
Quadro A 15. Fator de redução para a resistência ao escoamento de seções sujeitas a flambagem local .....	85
Quadro A 16. Banco de dados da Gerdau para Perfis de Aço Laminado .....	85

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Considerações iniciais .....	13
1.2	Justificativa .....	14
1.3	Objetivo.....	15
1.4	Estrutura do TCC .....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	17
2.1	Concreto Armado .....	17
2.1.1	Conceituação .....	17
2.1.2	Estados limites e determinação de esforços solicitantes .....	18
2.1.3	Dimensionamento de seções retangulares: flexão simples.....	21
2.1.4	Dimensionamento de seções retangulares: esforço cortante .....	26
2.1.5	Considerações para o detalhamento de armadura .....	28
2.2	Aço.....	31
2.2.1	Considerações iniciais e características das seções .....	31
2.2.2	Estados limites e combinações de ações .....	33
2.2.3	Dimensionamento à flexão: perfis de alma não-esbelta .....	34
2.3	Madeira .....	39
2.3.1	Considerações iniciais .....	39
2.3.2	Propriedades das peças estruturais .....	40
2.3.3	Estados limites e combinações de ações .....	42
2.3.4	Dimensionamento à flexão simples: bases de cálculo.....	44
2.4	Comportamento dos materiais em situação de incêndio .....	45
2.4.1	Concreto armado .....	46
2.4.2	Aço .....	48
2.4.3	Madeira.....	49
2.5	Análise de custos dos materiais: Precificação .....	51
3	METODOLOGIA .....	52
3.1	Revisão bibliográfica.....	52
3.2	Desenvolvimento da rotina de cálculo .....	52
3.3	Desenvolvimento do código computacional e validação dos resultados.....	52
3.4	Análise comparativa.....	53
4	O CÓDIGO COMPUTACIONAL.....	54
4.1	A Linguagem <i>Visual Basic</i> .....	54

4.2	Concremaço <sup>®</sup> 1.0 versão <i>beta</i> .....	54
4.2.1	Rotinas de cálculo .....	54
4.2.2	Apresentação do Programa: Manual de utilização .....	54
4.2.3	Exemplo de cálculo 1 .....	63
4.2.4	Validação dos resultados .....	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	73
6.1	Sugestões para futuras pesquisas .....	73
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
	ANEXOS.....	78
	ANEXO A_QUADROS COM INFORMAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO .....	78
	ANEXO B – VERIFICAÇÃO PARA VIGAS DE CONCRETO USANDO O <i>TQS</i> .....	88
	ANEXO C – VERIFICAÇÃO PARA VIGAS DE AÇO ATRAVÉS DO <i>CYPE 3D</i> .....	90
	APÊNDICES.....	93
	APÊNDICE A – PRECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	93
	APÊNDICE B – RELATÓRIO DE CÁLCULO EMITIDO PELO CONCREMAÇO <sup>®</sup> PARA VIGAS DE CONCRETO.....	94
	APÊNDICE C – ROTEIRO DE CÁLCULO PARA VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DE VIGAS DE CONCRETO ATRAVÉS DO MÉTODO ANALITICO .....	94
	APÊNDICE D – RELATÓRIO DE CÁLCULO EMITIDO PELO CONCREMAÇO <sup>®</sup> PARA VIGAS DE AÇO .....	97
	APÊNDICE E – ROTEIRO DE CÁLCULO PARA VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DE VIGAS DE AÇO ATRAVÉS DO MÉTODO ANALITICO .....	98
	APÊNDICE F – RELATÓRIO DE CÁLCULO EMITIDO PELO CONCREMAÇO <sup>®</sup> PARA VIGAS DE MADEIRA.....	100
	APÊNDICE G – ROTEIRO DE CÁLCULO PARA VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DE VIGAS DE MADEIRA ATRAVÉS DO MÉTODO ANALITICO.....	101

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

O concreto armado é, atualmente, um dos materiais mais utilizados na construção das mais diversas estruturas. Esse material construtivo é amplamente disseminado, podendo ser encontrado em todas as casas de alvenaria, em rodovias, em pontes, nos edifícios mais altos do mundo, em torres de resfriamento, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento e até em plataformas de extração petrolífera móveis. É estimado que, anualmente, são consumidos 11 bilhões de toneladas de concreto, o que equivale a um consumo de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano (PEDROSO, 2009). No Brasil, o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos, incluindo que esses números crescem surpreendentemente a cada ano com o rápido crescimento urbano das cidades brasileiras.

Tal fato pode estar ligado às suas excelentes propriedades de resistência, facilidade de execução de formas, resistência ao fogo, agentes atmosféricos ou desgaste mecânico, além de praticamente não requerer conservação ou manutenção (ARAÚJO, 2014), desde que durante a sua execução sejam respeitadas as exigências normativas relacionadas à durabilidade das peças dimensionadas. Apesar das já conhecidas vantagens da utilização do concreto armado, é válido mencionar que ele também apresenta algumas desvantagens, principalmente quando se considera o peso próprio das estruturas construídas em concreto e a dificuldade de, muitas vezes, realizar demolições e reformas. Além disso, em casos onde são necessários grandes vãos, a adoção do concreto como elemento estrutural exige o emprego de vigas com alturas elevadas, o que pode se tornar um fator limitante, principalmente quando se trabalha com pé-direito de dimensões convencionais de até 3,00 (três) metros.

Levando em consideração as dificuldades do emprego do concreto em determinadas situações, é necessário que se tenha conhecimento acerca das propriedades de outros materiais construtivos, como aço e madeira, e que se possa comparar o desempenho de tais materiais com o do concreto. Tal comparação deve ser feita não somente em termos financeiros, mas também, em relação à capacidade de resistência às cargas solicitantes e acomodação de deformações.

Com esse trabalho buscou-se desenvolver um *software* de dimensionamento e detalhamento de peças em concreto armado, madeira e aço, a fim de comparar as dimensões

obtidas de seção para cada material e se ter um parâmetro financeiro, capaz de nortear a escolha de projetistas em situações práticas, sejam elas sob ações de cargas permanentes, acidentais e de incêndio.

## 1.2 Justificativa

O dimensionamento de vigas, sejam elas de concreto armado, madeira ou aço é um processo que requer uma quantidade expressiva de cálculos, uma vez que precisam ser consideradas as hipóteses em termos de combinações de cargas, bem como as formulações relacionadas às bases de dimensionamento de cada material. Sabe-se que o cálculo a mão de tais elementos não é uma tarefa impossível de ser feita, mas em situações em que os resultados precisam ser obtidos de forma imediata ou com velocidade considerável, em situações de projeto, por exemplo, surge a necessidade de meios mais práticos para tal dimensionamento, podendo-se citar a possibilidade de desenvolvimento de rotinas de cálculo por meio da programação.

A programação é, hoje, uma “ferramenta” muito importante no campo da engenharia, em todas as suas especialidades. Utilizar a programação para a resolução dos mais diversos problemas vêm se tornando uma prática cada vez mais comum. Nesse sentido, a linguagem de programação *Visual Basic* (VB) possui muitas características que a tornam atrativa. Além de ter um ambiente de programação bem concebido, é relativamente de fácil utilização, pois sua rotina de cálculo se assemelha bastante a outras linguagens que são estudadas em disciplinas de programação nos primeiros semestres de curso. Outro diferencial do VB é a possibilidade de desenhar e programar a interface gráfica em uma gama bastante variada de aplicações.

Em diversas situações de projeto, quando se tem a possibilidade da adoção de diferentes concepções e o emprego de diferentes materiais, é interessante que se consiga montar rotinas de cálculo para cada hipótese e, em seguida, compará-las, tanto na relação custo x benefícios, quanto no desempenho estrutural.

Quando se fala em desempenho, deve-se levar em consideração não só a capacidade da peça em resistir aos esforços para os quais foi dimensionada sem sofrer ruptura, mas também de preservar as características estéticas inicialmente desejadas e de se manter em condições de utilização que garantam o conforto do usuário.

Com relação aos esforços, em geral, as peças são dimensionadas para resistirem a determinadas ações, que podem ser acidentais, permanentes ou extraordinárias, as quais serão abordadas com maior ênfase ao longo deste trabalho. Mas o que se quer mencionar aqui é a importância de se considerar as cargas oriundas de situações de incêndio em cada projeto, dado que o fogo, quando em contato com o elemento reduz, significativamente sua resistência, sendo este comportamento diferente para cada material estudado. Saber como considerar tal carga, quais coeficientes a serem adotados, bem como a resposta das peças dimensionadas a tal solicitação é um fator primordial na etapa de projeto.

### 1.3 Objetivo

O presente estudo objetiva realizar uma análise comparativa do dimensionamento de vigas em concreto, madeira e aço para uma mesma solicitação. Para tanto, os objetivos específicos da pesquisa foram:

- Desenvolver um *software* para o dimensionamento e detalhamento de seções de vigas em concreto, madeira e aço;
- Fazer um comparativo, para um mesmo carregamento, entre os dimensionamentos obtidos para cada material;
- Fazer um comparativo entre os resultados obtidos com o *software* desenvolvido, o cálculo analítico e pacotes computacionais já consagrados;
- Considerar as ações de incêndio nas combinações de cálculo;
- Comparar os custos do emprego de cada material, baseados nos resultados obtidos no dimensionamento.

### 1.4 Estrutura do TCC

Ademais de tudo o que foi tratado até aqui, os capítulos seguintes deste TCC abordarão os seguintes aspectos:

- **Capítulo 2:** Será destinado a contextualização do assunto a ser estudado, com apresentação de conceitos gerais e bases de cálculo;
- **Capítulo 3:** Apresentará o método de trabalho e a forma como a pesquisa foi conduzida;

- **Capítulo 4:** Tratará da apresentação do manual de utilização do Software e também se destinará a validação do código desenvolvido, com uma análise comparativa obtida através do método analítico e também por meio de pacotes de cálculo estrutural já conhecidos: *TQS e Cype3D*..
- **Capítulo 5:** Apresentará os resultados acerca da análise comparativa entre valores obtidos para os 3 (três) materiais em estudo.
- **Capítulo 6:** Se destinará às considerações finais sobre a pesquisa desenvolvida.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Concreto Armado**

#### **2.1.1 Conceituação**

O concreto é um material obtido da mistura dos agregados (naturais ou britados) com cimento e água (ARAÚJO, 2014). Em algumas situações, para melhorar as suas características, poderão ser ainda adicionados aditivos químicos retardadores ou acelerados de pega, superplastificantes, entre outros, em função de necessidades específicas.

Apesar de possuir resistência à compressão considerável, que depende de diversos fatores como: composição do concreto, condições cura, velocidade de aplicação das cargas, estado de tensões, forma e dimensões dos elementos e etc., o concreto possui uma resistência à tração da ordem de 10% da resistência à compressão, que por sinal, não é considerada nas situações de dimensionamento dos elementos estruturais, apenas na verificação das deformações da estrutura sob as cargas de serviço.

Em função da baixa resistência à tração do concreto, em situações em que o mesmo se encontrar tracionado, é necessária a sua associação com o aço, dando assim origem ao concreto armado. O bom funcionamento destes dois materiais só é possível graças a aderência, que equivale ao contato efetivo entre eles e que é alcançada em função do correto detalhamento das armaduras e do cumprimento das exigências normativas, no que se refere à ancoragem.

Segundo Araújo (2014), o concreto armado possui algumas vantagens com relação aos outros materiais, a citar: economia, facilidade de execução em diversos tipos de formas, resistência ao fogo, aos agentes atmosféricos e ao desgaste mecânico e praticamente não requer manutenção, mas existem algumas desvantagens desse elemento como o elevado peso das construções e a baixa proteção térmica que devem ser analisadas durante o projeto, podendo, inclusive, conduzir à escolha de materiais alternativos para a execução da estrutura.

A seguir serão apresentadas as bases de cálculo e as condições que devem ser observadas para o dimensionamento e detalhamento de elementos em concreto armado.

### 2.1.2 Estados limites e determinação de esforços solicitantes

O projeto de estruturas de concreto armado consiste na determinação de uma seção que seja capaz de suportar esforços solicitantes e que atenda os seguintes requisitos de qualidade (ARAÚJO, 2014): Segurança, que garante a resistência às cargas de dimensionamento, bom desempenho em serviço, que garante que os elementos apresentarão fissuras e deformações de modo a não afetar sua utilização e durabilidade, que garante que os elementos se manterão em bom estado de conservação diante da influência de agentes externos.

Os dois primeiros requisitos estão relacionados à segurança da estrutura à ruptura e quando não são atendidos, diz-se que se atingiu um estado limite último. Já a durabilidade, está ligada aos estados limites de utilização. Em geral, o dimensionamento dos elementos é realizado de modo a garantir nível de segurança às estruturas, de modo que elas atendam os estados limites últimos. Toda metodologia de cálculo que será descrita a seguir se baseia nessa hipótese.

No que se refere à durabilidade da estrutura, a NBR 6118/2014 estabelece que esta é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do cobrimento da armadura, que tem como principal função a proteção das mesmas, impedindo que a corrosão aja sobre elas e prejudiquem seu desempenho estrutural. Os quadros A1 e A2 em anexo trazem as principais recomendações da NBR 6118/2014 no que se refere ao cobrimento das armaduras e classes de agressividade ambiental.

No que se refere a determinação dos esforços solicitantes de projeto, estes são obtidos através de combinações de ações de cálculo, que podem ser classificadas como permanentes, variáveis e excepcionais a depender da sua duração e solicitação. O item 11 da NBR 6118/2014 traz uma definição completa de cada uma dessas ações.

Segundo Carvalho (2014) as ações cálculo  $F_d$  são obtidas, para as várias combinações de ações, multiplicando-se seus valores representativos pelos respectivos coeficientes de ponderação  $\gamma f$ . Para identificar o tipo de ação considerada, o coeficiente  $\gamma f$  é representado como  $\gamma_g$  para as ações permanentes (ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida útil da estrutura) e  $\gamma_q$  para as ações variáveis (valores que sofrem variações durante toda a vida útil da estrutura).

Nesse trabalho foram consideradas as seguintes formulações para combinação de ações:

- a) **Combinação última para carregamento normal:** Todas as ações permanentes são tidas como principais. No caso das ações variáveis, uma é definida como principal, atuando com seu valor característico e as demais atuam com seus valores reduzidos de combinação  $\psi_o F_k$ .

$$F_d = \gamma_g \cdot F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} \cdot F_{\varepsilon gk} + \gamma_q \cdot (F_{q1k} + \psi_{oj} \cdot F_{qjk}) + \gamma_{\varepsilon q} \cdot \psi_{o\varepsilon} \cdot F_{\varepsilon qk} \quad (1)$$

Onde:

$F_d$  – valor de cálculo das ações para combinação última;

$F_{gk}$  – representa as ações permanentes diretas;

$F_{\varepsilon k}$  – representa as ações indiretas permanentes como a retração e variáveis como a temperatura;

$F_{qk}$  – representa as ações variáveis diretas;

$\gamma_g, \gamma_q, \gamma_{\varepsilon g}$  e  $\gamma_{\varepsilon q}$  – expressos nos quadros A4 e A5;

$\psi_{oj}, \psi_{o\varepsilon}$  – expressos no Quadro A3;

- b) **Combinação última para carregamento de construção:** será considerada a mesma Equação 1. A única diferença será que, nos casos em que a carga variável principal tiver curta duração, o fator redutor  $\psi_{oj}$  poderá ser substituído por  $\psi_2$ .
- c) **Combinação última para carregamento excepcional:** será considerada a mesma Equação 1, adicionada do termo  $F_{q1exc}$  referente à ação excepcional. Nessa combinação poderá ser igual utilizado o fator redutor  $\psi_2$  quando a carga variável principal tiver curta duração.

$$F_d = \gamma_g \cdot F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} \cdot F_{\varepsilon gk} + F_{q1exc} + \gamma_q \cdot (F_{q1k} + \psi_{oj} \cdot F_{qjk}) + \gamma_{\varepsilon q} \cdot \psi_{o\varepsilon} \cdot F_{\varepsilon qk} \quad (2)$$

Onde:

$F_{q1exc}$  – é a ação excepcional.

Os demais termos foram definidos no item a).

No que se refere às resistências de cálculo, elas são obtidas através da divisão das resistências características dos materiais por um coeficiente parcial de segurança. Sendo assim, para o concreto se adota o  $f_{cd}$  como sendo a resistência a compressão e para o aço, a tensão de escoamento de cálculo será dada por  $f_{yd}$ , que poderão ser obtidos pelas expressões abaixo:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3)$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (4)$$

Onde,

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

$f_{yk}$  – é a tensão de escoamento característica do aço;

$\gamma_c, \gamma_s$  – são coeficientes de redução parciais, obtidos pelo Quadro A6 em anexo.

No caso do concreto, ainda se considera que a sua resistência sofre uma redução em função da velocidade de carga aplicada (efeito Rüschi). Que será dada por:

$$\sigma_{cd} = \alpha_c f_{cd} \quad (\alpha_c < 1) \quad (5)$$

Segundo a NBR 6118/2014, o coeficiente  $\alpha_c$  tem os seguintes valores:

$$\alpha_c = 0,85, \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (6)$$

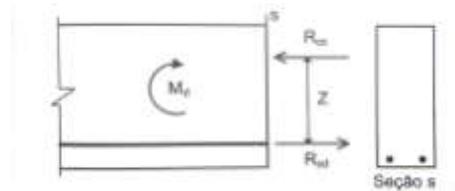
$$\alpha_c = 0,85x \left[ 1 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \right], \quad \text{se } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (7)$$

### 2.1.3 Dimensionamento de seções retangulares: flexão simples

Flexão simples equivale à condição de solicitação de uma viga apenas por um momento fletor  $M$ , admitindo-se também a coexistência de um esforço cortante  $Q$ , que varia ao longo da viga com a mesma taxa com que ocorre variação do momento fletor.

Admite-se que na flexão simples a ruptura da seção (estado limite último) pode ocorrer nos domínios de dimensionamento 2, 3 e 4 (ARAÚJO,2014), pois é apenas nesses domínios que existe o equilíbrio entre as tensões de compressão do concreto e de tração das armaduras, formando um binário, capaz de equilibrar o momento solicitante de cálculo  $M_d$  (Figura 1). Estes limites se diferenciam pelas seguintes solicitações que ocorrem na seção de concreto:

Figura 1. Binário de tensões aço-concreto.



Fonte: ARAÚJO (2014).

- Domínio 2: Flexão simples ou composta sem a ruptura total do concreto ( $\epsilon_c < \epsilon_u$ ) e com alongamento máximo permitido para o aço ( $\epsilon_s = 0,10\%$ ). ( $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_u$  e  $\epsilon_s$  obtidos a partir do diagrama tensão x deformação para os dois materiais).
- Domínio 3: Flexão simples ou composta com ruptura à compressão do concreto e com o escoamento do aço ( $\epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$ ).

$$\epsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (8)$$

Sendo  $E_s$  o módulo de elasticidade do aço, correspondendo a tangente do trecho linear do diagrama tensão x deformação deste material, e considerado neste trabalho com o valor de 200 GPa, conforme recomendações de ARAÚJO (2014) e da EUROCODE 2.

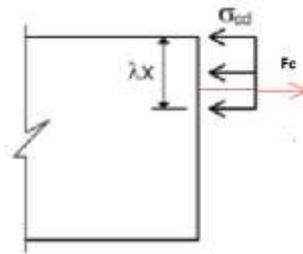
- Domínio 4: Flexão simples ou composta com ruptura à compressão do concreto e sem o escoamento do aço ( $\epsilon_s < \epsilon_{yd}$ ).

Nota: o dimensionamento é feito preferencialmente nos domínios 2 e 3, pois no domínio 4 tem-se uma situação de seção superarmada, com comportamento frágil e com ruptura sem grandes deformações. Quando o domínio 4 for atingido, deverão ser tomadas algumas providências no dimensionamento, conforme será explicado posteriormente.

Toda a formulação de dimensionamento é feita com base no comportamento dos materiais. No caso do concreto, quando submetido a tensões, medindo-se suas deformações e relacionando-as em um gráfico é possível obter um diagrama, de comportamento parabólico-retangular.

Para simplificar a formulação de dimensionamento, a NBR 6118/2014 permite que seja utilizado um modelo retangular, de onde poderá ser deduzida a tensão resistente do concreto (Figura 2).

Figura 2. Diagrama simplificado tensões do concreto.



Fonte: Adaptado de ARAÚJO (2014).

Da Figura (2), tem-se  $\sigma_{cd}$  calculado pela seguinte Equação (9):

$$\sigma_{cd} = \frac{F_c}{\lambda \cdot x \cdot b} \quad (9)$$

Sendo ( $\lambda \cdot x$ ) a distância até onde as tensões do concreto poderão ser consideradas constantes,  $x$  é a profundidade da linha neutra e  $\lambda$  pode ser calculado por:

$$\lambda = 0,8, \quad \text{se } fck \leq 50 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$\lambda = 0,8 - \frac{fck - 50}{400}, \quad \text{se } fck > 50 \text{ MPa} \quad (11)$$

Conforme apresentado acima, o dimensionamento no domínio 4 não é desejado. Nesse sentido, é conveniente limitar a altura da linha neutra de modo a obter uma ruptura longe desse domínio. Fazendo uso do mapa de domínios das seções em concreto armado (item 17.2.2 NBR 6118/2014) e considerando o limite de deformações para cada um deles, a partir da Equação 12 é possível obter a altura da linha neutra para o domínio 3.

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u + \varepsilon_{yd}} \quad (12)$$

Sendo  $\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s}$  (com todos os parâmetros anteriormente definidos), obtém-se:  $\varepsilon_{b,dominio3} = 0,617$ . Porém, para garantir mais ductilidade às seções, a NBR 6118/2014 e o CEB/90 passaram a adotar os seguintes limites de linha neutra:

Tabela 1. Profundidade da linha neutra

Norma de referência	Limite linha neutra $\xi_{lim}$	Classe do concreto
NBR 6118/2014	$x/d \leq 0,45$	$fck \leq 50 \text{ MPa}$
	$x/d \leq 0,35$	$50 < fck \leq 90 \text{ MPa}$
CEB/90	$x/d \leq 0,45$	$fck \leq 35 \text{ MPa}$
	$x/d \leq 0,35$	$fck > 35 \text{ MPa}$

Fonte: Elaborado pelo autor

#### a) Dimensionamento com armadura simples:

A formulação para o dimensionamento com armadura de tração será feita com o auxílio da Figura 1. A ideia é determinar um valor de momento limite, onde para valores

inferiores a este o dimensionamento será feito com armadura simples e acima, com armadura dupla.

Considerando-se um valor de linha neutra limite  $x_{lim}$  (ver Tabela 1) e com o auxílio das figuras 1 e 2 tem-se:

$$F_c = \lambda x_{lim}.b.\sigma_{cd} \quad (13)$$

$$F_s = f_y d.A_s \quad (14)$$

Considera-se a resultante das forças de compressão atuando no centroide de gravidade das armaduras, com valor de (Araújo, 2014):

$$z_{lim} = d - 0,5.\lambda x_{lim}. \quad (15)$$

O valor de  $d$  não é apresentado nas figuras 1 e 2, mas equivale à distância do centro de gravidade da armadura de tração à borda mais comprimida da seção solicitada.

O momento limite é definido como:

$$M_{d,lim} = Z_{lim}.F_c = (d - 0,5.\lambda x_{lim}).(\lambda x_{lim}.b.\sigma_{cd}) \quad (16)$$

Considera-se  $x = \xi_{lim}.d$  (17) e admite-se uma parcela chamada de momento reduzido, que é definida por:

$$\mu_{lim} = \frac{M_{d,lim}}{bd^2\sigma_{cd}} \quad (18)$$

Nesse sentido, calculando-se  $\mu$  para qualquer situação e obtendo-se um valor superior a  $\mu_{lim}$ , o dimensionamento será feito com armadura dupla.

O valor de  $\xi$  é determinado por substituição de variáveis das equações anteriores, podendo ser calculado por:

$$\xi = \frac{1 - \sqrt{1 - 2\mu}}{\lambda}; \quad 0 < \xi < 1 \quad (19)$$

A expressão para o cálculo das armaduras é obtida igualando-se as equações 13 e 14:

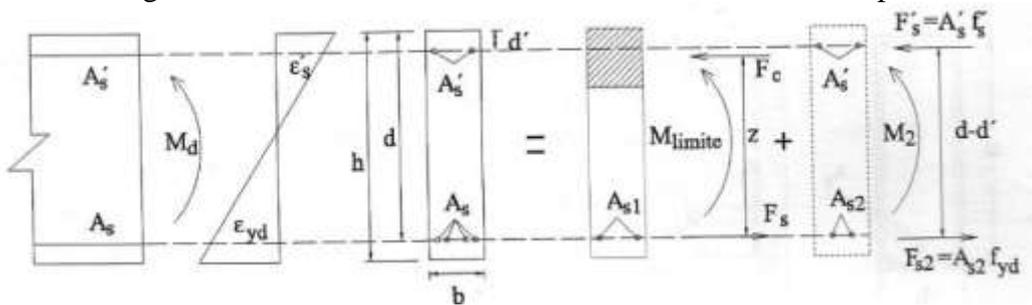
$$A_s = \lambda \cdot \xi \cdot b \cdot d \cdot \sigma_{cd} / f_{yd} \quad (20)$$

$$A'_s = 0 \quad (21)$$

#### b) Dimensionamento com armadura dupla:

No caso do dimensionamento com armadura dupla, tem-se a condição apresentada na Figura 3, onde a parcela de momento  $\Delta M$  que ultrapassou a condição de  $\mu_{lim}$  será resistida por uma armadura de compressão  $A'_s$ . Nesse caso, o equilíbrio de momento para a determinação das expressões de dimensionamento foi feito de forma semelhante ao item a.

Figura 3. Dimensionamento de armadura com armadura dupla



Fonte: CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO (2014)

$$A_s = \left( \lambda \xi_{lim} + \frac{\mu - \mu_{lim}}{1 - \delta} \right) \times \frac{bd \sigma_{cd}}{f_{yd}} \quad (22)$$

$$As' = \frac{(\mu - \mu_{lim}) \cdot bd \sigma_{sd}}{(1 - \delta') \sigma'_{sd}} \quad (23)$$

A condição de  $\varepsilon_s > \varepsilon_{yd}$  para a armadura tracionada continua válida e a tensão sendo igual a  $f_{yd}$ . Já o valor de  $\sigma'_{sd}$  é obtido por semelhança de triângulo, podendo seu valor ser determinado através das seguintes equações:

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_u \left( \frac{\xi_{lim} - \delta}{\xi_{lim}} \right) \quad (24)$$

$$\sigma'_{sd} = E_s \cdot \varepsilon'_s \quad (25)$$

$$\delta = \frac{d'}{d} \quad (26)$$

Em cada caso, seja para as condições de armadura dupla ou de armadura simples, devem ser verificadas as considerações com relação a armadura mínima, conforme recomendações do item 17.3.5.2.1 da NBR ABNT 6118/2014.

#### 2.1.4 Dimensionamento de seções retangulares: esforço cortante

Segundo Pinheiro (2010), a formulação para determinação da armadura transversal de uma viga é obtida a partir da analogia entre uma treliça e uma viga fissurada, estando esta submetida a vários estágios de carregamento. Tal teoria foi idealizada por Ritter e Morsch no início do século XX. Ainda de acordo com Pinheiro (2010),

Considerando uma viga biapoiada de seção retangular, Ritter e Morsch admitiram que, após a fissuração, seu comportamento é similar ao de uma treliça, formada pelos seguintes elementos:

- Banzo superior: Cordão de concreto comprimido;
- Banzo inferior: armadura Longitudinal de tração;
- Diagonais comprimidas: Bielas de concreto entre fissuras;

- Diagonais tracionadas: Armadura transversal (de cisalhamento).

Em geral, a NBR 6118/2014 no seu item 17.4.1 admite dois modelos de cálculo, porém o único modelo a ser citado e considerado neste trabalho é o modelo I, cujas hipóteses são: bielas com inclinação de  $\theta = 45^\circ$  e  $V_c$  (cortante resistido pelo concreto) constante. Considerando o Modelo I e seguindo recomendações normativas, a sequência de verificações e cálculos necessários a determinação da armadura transversal será:

- Determinação dos esforços solicitantes: feito conforme combinações de ações apresentadas no item 2.1.2.
- Verificação da compressão diagonal do concreto:

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \quad (27)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (28)$$

$$V_{Rd2} \leq 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot bw \cdot d \quad (29)$$

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right), \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (30)$$

- Cálculo da armadura transversal

$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (31)$$

$$V_c = 0,6 f_{ctd} b w d \quad (32)$$

$$f_{ctd} = \frac{0,7 f_{ctm}}{\gamma_c} \quad (33)$$

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,3 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}}, & \text{para concreto} \leq 50\text{MPa} \\ 2,12Ln, & \text{para os demais casos} \end{cases} \quad (34)$$

$$\frac{As_w}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9df_{ywd}(\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha)} \quad (35)$$

Onde,

$V_{sd}$  – é o esforço cortante solicitante;

$V_{Rd2}$  – força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas;

$V_{Rd3}$  – força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais por tração;

$V_c$  – é a parcela do cortante absorvida pelo concreto;

$V_{sw}$  – é a parcela do cortante absorvida pelas armaduras;

$b_w$  – é a menor dimensão do elemento;

$d$  – é a distância entre o CG da armadura de tração e a borda mais comprimida da viga;

$f_{ctd}$  – Resistência de cálculo de tração do concreto;

$\alpha$  – é a inclinação dos estribos com a vertical; usualmente  $\alpha = 90^\circ$ .

### 2.1.5 Considerações para o detalhamento de armadura

Serão listadas algumas recomendações da NBR 6118/2014 para o detalhamento de armaduras longitudinais;

- a) Disposição das armaduras longitudinais na seção transversal: deverão ser adotados tais cuidados a fim de facilitar a concretagem ou evitar ninhos de concreto: Conforme recomendações da NBR 6118/2014, os espaçamentos a serem respeitados são:

$$\partial h \geq \begin{cases} 20 \text{ mm} \\ \emptyset \text{ barra} \\ 1,2 \cdot D_{\text{máx agr graúdo}} \end{cases}$$

$$\partial v \geq \begin{cases} 20 \text{ mm} \\ \emptyset \text{ barra} \\ 0,5 \cdot D_{\text{máx agr graúdo}} \end{cases}$$

Onde,

*D<sub>máx agr graúdo</sub>* – equivale ao dimensão do maior agregado utilizado na dosagem;

- b) Cálculo do comprimento de ancoragem: Critérios a serem observados para garantir aderência aço x concreto. Será calculado um comprimento de ancoragem a partir da seguinte relação:

$$l_b = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \geq 25 \text{ cm} \quad (36)$$

$$F_{bd} = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot f_{ctd} \quad (37)$$

$$- n_1 = \begin{cases} 1,0 \text{ para CA} - 25 \\ 1,4 \text{ para CA} - 60 \\ 2,25 \text{ para CA} - 50 \end{cases} \quad (38)$$

$$- n_2 = \begin{cases} 1,0 \text{ para zona de boa aderência} \\ 0,7 \text{ para zonas de má aderência} \end{cases} \quad (39)$$

$$- n_3 = \begin{cases} 1,0 \text{ para } \emptyset < 32 \text{ mm} \\ \frac{132 - \emptyset}{100} \text{ para } \emptyset \geq 32 \text{ mm} \end{cases} \quad (40)$$

$$l_{b, nec} = \alpha_1 \cdot l_b \cdot \frac{A_{s, calc}}{A_{s, efetivo}} \geq l_{b, min} \quad (41)$$

$$Lb, \min \geq \begin{cases} 0,3 \cdot Lb \\ 10 \cdot \phi \\ 100\text{mm} \end{cases} \quad (42)$$

Onde:

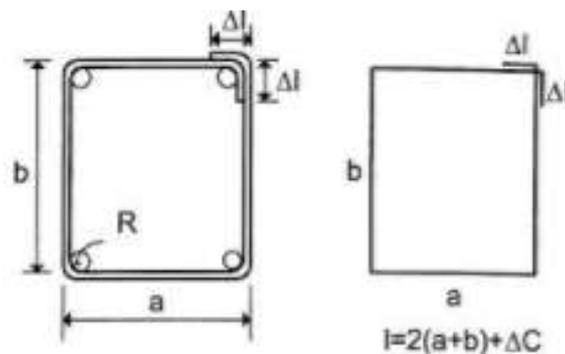
$\alpha_1 = \{ 1 \rightarrow \text{Barras sem gancho}; 0,7 \rightarrow \text{Barras com gancho} \}$

$A_{s, \text{calc}} = \text{Armadura necessária para resistir ao esforço solicitante}$

$A_{s, \text{efetivo}} = \text{área de armadura efetiva}$

- c) Gancho dos estribos: Para o cálculo do gancho dos estribos utilizou-se a recomendação de ARAÚJO (2014), que relacionou o comprimento do gancho com a bitola utilizada em projeto (ver Figura 4 e Quadro 1).

Figura 4. Gancho dos estribos



Fonte: ARAÚJO (2014)

Quadro 1. Dimensões gancho estribos

Dimensões para gancho dos estribos (cm)						
$\phi_t$	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0
$\Delta l$	7	8	10	13	17	22
$\Delta C$	10	11	13	17	20	26

Fonte: Adaptado ARAÚJO (v.2), 2014

Assim como foi informado para as armaduras longitudinais, devem ser verificadas as condições em termos de armadura mínima para as armaduras transversais, conforme recomendações da ABNT NBR 6118/2014, item 17.4.1.1.

## 2.2 Aço

### 2.2.1 Considerações iniciais e características das seções

As estruturas de aço vêm sendo largamente utilizadas nos países desenvolvidos por propiciarem construções limpas e rápidas que geram mínima interferência em seu entorno (GUANABARA, 2010).

De acordo com Bellei (2006) as principais vantagens das estruturas de aço são:

- a) Alta resistência do material nos diversos estados de tensão, o que permite aos elementos estruturais suportarem grandes esforços apesar da área relativamente pequena das suas seções; por isso, as estruturas de aço, apesar de possuírem elevada densidade, são mais leves que as estruturas em concreto armado;
- b) Os elementos de aço oferecem uma grande margem de segurança no trabalho, o que se deve ao fato de o material ser único e homogêneo, com limite de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade bem definidos;
- c) Os elementos de aço são fabricados em oficinas, de preferência seriados, e sua montagem é bem mecanizada, permitindo, com isso, diminuir o prazo final de construção;
- d) Os elementos de aço podem ser desmontados e substituídos com facilidade, o que permite reforçar ou substituir, facilmente, diversos elementos de estrutura;
- e) Possibilidade de reaproveitamento do material que não seja mais utilizado na construção.

Uma desvantagem das peças metálicas é a impossibilidade de ser moldada em obra e sua variedade se limita aos perfis que são disponibilizados pelos fabricantes.

É exatamente por possuírem dimensões padronizadas, que o dimensionamento dos perfis metálicos não consistirá na determinação das suas dimensões, mas sim, na escolha do que seja mais adequado a cada situação de projeto.

Segundo Pfeil & Pfeil (2009) o aço é uma liga de ferro e carbono, além de a este serem incorporados elementos residuais decorrentes do seu processo de fabricação. O teor de carbono é variável para os diferentes tipos de aço, podendo ter valores entre 0,008% e 2,11%. Tal situação faz com que suas propriedades mecânicas variem, pois a medida que os seus teores aumentam, sua resistência aumenta, o tornando, em contrapartida, mais frágil. Diminuindo seus teores, a resistência à tração diminui, porém, ele se torna mais dúctil.

Por esse motivo, a NBR 8800/2008 define propriedades a serem consideradas em todos os projetos de estruturas de aço:

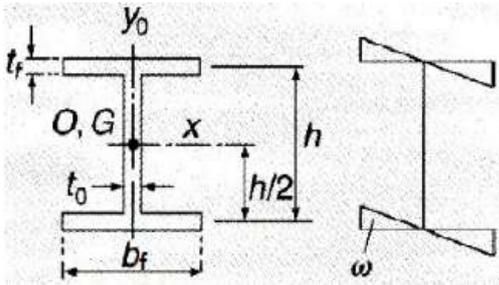
Quadro 2. Constantes físicas do aço para projeto

Características físicas	
Módulo de deformação longitudinal (E)	200 GPa
Coeficiente de Poisson ( $\nu_0$ )	0,3
Coeficiente de dilatação térmica ( $\beta_0$ )	$12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Massa específica ( $\rho_a$ )	7850 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade transversal (G)	77 GPa

Fonte: ABNT NBR 8800/2008

No dimensionamento, além das constantes físicas de projeto devem ser consideradas também as propriedades geométricas de cada perfil, tais como: Constante de empenamento ( $C_w$ ), Momento de inércia à torção pura ( $J$ ), módulo plástico ( $Z$ ), módulo elástico ( $W$ ) e etc., pois elas serão determinantes no cálculo do momento resistente de cada um. Tais propriedades dependem, simplesmente, das dimensões padronizadas da seção. O Quadro 3 apresenta um resumo de tais valores para seções I.

Quadro 3. Características geométricas da seção I

	$C_w = \frac{I_f h^2}{2} = \frac{t_f b_f^3 h^2}{24} = \frac{h^2 I_y}{4}$ $Z_x = b_f t_f (h - t_f) + \frac{t_o}{4} (h - 2t_f)^2$ $Z_y = \frac{b_f^2 t_f}{2} + \frac{1}{4} (h - 2t_f) t_o^2$ $J = \frac{1}{3} (2b_f^3 + h t_o^3); W = I/y_{max}$
---	--

Fonte: Adaptado de Pfeil &amp; Pfeil (2009)

Além de todas as propriedades até então mencionadas, outra condição que deve ser observada nos perfis metálicos se refere à esbelteza, que consiste na relação entre a largura e espessura da seção transversal dos mesmos.

A relação entre a esbeltez dos perfis e os limites definidos pela NBR 8800 permitirá classificar os perfis metálicos em diferentes categorias, determinando ainda, a forma como cada um destes será afetado pela flambagem local. As seções de vigas podem ser divididas em três classes conforme a influência da flambagem local sobre os respectivos momentos fletores resistentes.

- a) Seção compacta: é aquela que atinge o momento de plastificação total ( $M_{res} = M_p$ ) e cujo limite  $\lambda_b \leq \lambda_p$  é atingido;
- b) Seção semicompacta: é aquela em que a flambagem local ocorre após ter desenvolvido plastificação parcial ( $M_{res} > M_p$ ) e cujo limite  $\lambda_p < \lambda_b \leq \lambda_r$  é observado.
- c) Seção esbelta: seção na qual a ocorrência de flambagem local impede que seja atingido o momento de início de plastificação ( $M_{res} < M_p$ ) e cujo limite  $\lambda_r < \lambda_b$  é observado.

## 2.2.2 Estados limites e combinações de ações

Para Pfeil & Pfeil (2009), o estado limite de serviço ou de utilização é atingido quando a estrutura passa a apresentar vibrações ou deformações excessivas, trazendo desconforto para os usuários. Mas tal condição não será abordada neste trabalho.

Já o estado limite último está associado à capacidade de resistir às cargas para as quais as estruturas foram dimensionadas sem entrar em colapso. Neste caso, os esforços solicitantes devem ser sempre menores que os resistentes.

Os esforços solicitantes serão obtidos através de combinações de cálculo, cujos esforços serão majorados, com diferentes coeficientes, assim como foi feito para as estruturas de concreto e conforme foi apresentado na seção 2.1.3 deste trabalho. E no caso das resistências de cálculo de estruturas de aço, estas também serão minoradas.

Os valores de coeficientes de minoração e majoração para as estruturas de aço são apresentados nos quadros A7, A8 e A9 em anexo.

### 2.2.3 Dimensionamento à flexão: perfis de alma não-esbelta

No que se refere ao dimensionamento de perfis metálicos, este consistirá na comparação entre o momento resistente de cálculo da seção e o momento solicitante, obtido conforme exposto na seção 2.2.2.

$$M_{sd} \leq M_{Rd} \quad (43)$$

Onde:

$M_{sd}$  = momento solicitante de cálculo;

$M_{Rd}$  = momento resistente de cálculo.

É importante salientar que a resistência à flexão das vigas pode ser afetada pela flambagem lateral e local. Segundo Pfeil & Pfeil (2009):

A flambagem local é a perda da estabilidade das chapas comprimidas componentes do perfil, a qual reduz o momento resistente da seção. Na flambagem lateral a viga perde o equilíbrio no plano principal de flexão e passa a apresentar deslocamentos laterais e rotações de torção [...].

Os tipos de seções transversais mais adequados para o trabalho à flexão são aqueles com maior inércia no plano da flexão, isto é, com as áreas mais afastadas do eixo neutro. O ideal, portanto, é concentrar as áreas em duas chapas, uma superior e uma inferior, ligando-as por uma chapa fina. Concluímos, assim, que as vigas em forma de I são as mais funcionais [...]

Diante do exposto acima, o momento resistente será calculado para o caso de **flambagem lateral com torção (FLT)**, **flambagem local da mesa (FLM)** e **flambagem local da alma (FLA)**, sendo este o menor valor encontrado em cada caso. Além disso, o momento resistente dependerá da esbeltez do perfil, bem como da distância entre os pontos de contenção lateral das vigas ( $l_b$ ).

Segundo Pfeil & Pfeil (2009), no que se refere à classificação das vigas sem contenção lateral, estas poderão ser divididas em 3 (três) categorias:

- a) Vigas curtas: cujo efeito de flambagem lateral pode ser desprezado;
- b) Vigas intermediárias: estas vigas apresentam ruptura por flambagem lateral inelásticas, a qual é muito influenciada por imperfeições geométricas da peça e pelas tensões residuais embutidas durante o processo de fabricação da viga;
- c) Vigas longas: Atingem o limite de flambagem lateral em regime elástico, com o momento  $M_{cr}$ .

De acordo com a NBR 8800/2008, o momento resistente de cálculo para seções do tipo I, H, U, C, etc., com exceção do perfil T, para vigas de alma não-esbelta, é determinado de acordo com as seguintes equações:

- a) Para o estado limite FLT tem-se:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (44)$$

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left( M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r \quad (45)$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (46)$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad (47)$$

$$C_b = \frac{12,5M_{max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 3 \quad (48)$$

$$M_r = (f_y - \sigma_t) W \quad (49)$$

$$\sigma_t = 0,3f_y \quad (50)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (51)$$

$$\beta_1 = \frac{0,7W}{EJ} \quad (52)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w}\right)} \quad (53)$$

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (54)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (55)$$

Onde:

$M_{pl}$  – momento fletor de plastificação;

$C_b$  – fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme, adotado como 1 para flambagem local da mesa e da alma;

$\lambda$  – parâmetro de esbeltez da seção transversal;

$\lambda_p$  – parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

$\lambda_r$  – parâmetro de esbeltez correspondente ao início de plastificação;

$M_r$  – Momento correspondente ao início da plastificação;

$M_{cr}$  – Momento crítico na situação de flambagem lateral;

$M_A, M_B, M_C$  e  $M_{m\acute{a}x}$  – valor do momento a um quarto (1/4), na metade (1/2), a três quartos (3/4) (ambos medidos a partir da extremidade esquerda) e na seção mais solicitada ao longo do comprimento destravado;

$\sigma_t$  – tensão residual de compressão nas mesas;

$f_y$  – resistência de escoamento do aço;

$I_y, r_y$  – Momento de inércia e raio de giração, respectivamente, em relação ao eixo de maior momento de inércia;

$L_b$  – distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado).

E demais parâmetros já definidos em seções anteriores.

b) Para os estados limites FLM e FLA tem-se:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (44)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left( M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right), \text{ para } \lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r \quad (56)$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (46)$$

A Equação (46) não é aplicável para flambagem local da alma. Quando  $\lambda > \lambda_r$  for verificado no FLA, as condições para este caso são conforme Anexo H da NBR 8800/2008.

Para FLM:

$$\lambda = \frac{bf/2}{tf} \quad (57)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (58)$$

Para perfis laminados:

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c \quad (59)$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{0,7f_y}} \quad (60)$$

Para perfis soldados:

$$M_{cr} = \frac{0,9Ek_c}{\lambda^2} W_c \quad (61)$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{0,7f_y/k_c}} \quad (62)$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \quad (63)$$

Para FLA:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (64)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (65)$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (66)$$

Onde:

$W_c$  – módulo resistente elástico do lado comprimido da seção;

$k_c$  – coeficiente que varia entre 0,35 e 0,76.

E demais parâmetros já definidos em seções anteriores.

A NBR 8800/2008 em seu item 5.4.2.2 orienta que para assegurar a validade da análise elástica, o momento fletor resistente de cálculo não pode ser tomado maior que  $\frac{1,5xW_xf_y}{\gamma_{a1}}$ , sendo o módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal da barra em relação ao eixo de flexão.

## 2.3 Madeira

### 2.3.1 Considerações iniciais

A madeira é um material que há muito tempo vem sendo utilizado na construção. Em geral, sua utilização, se deve à sua facilidade de manuseio, além de sua excelente relação resistência/peso.

Pfeil & Pfeil (2003) trazem as seguintes considerações sobre as vantagens e desvantagens do uso da madeira:

A madeira possui características favoráveis ao uso em construção, tais como facilidade de fabricação de diversos produtos industrializados e bom isolamento térmico.

Por outro lado, a madeira está sujeita à degradação biológica por ataque de fungos, brocas, etc. e também à ação do fogo. Além disso, por ser o material natural, apresenta inúmeros defeitos, como nós e fendas que interferem em suas propriedades mecânicas. Entretanto, estes aspectos desfavoráveis são facilmente superados com o uso de produtos industriais de madeira, convenientemente tratados,

em sistemas estruturais adequados, resultando em estruturas duráveis e com características estéticas agradáveis.

As madeiras utilizadas na construção são obtidas de troncos de árvores e distinguem-se nas seguintes categorias (PFEIL & PFEIL, 2003):

- a) Madeiras duras: provenientes de árvores frondosas (dicotiledôneas, da classe angiosperma, com folhas achatadas e largas), de crescimento lento, como peroba, ipê, aroeira, carvalho, etc.; as madeiras duras de melhor qualidade são chamadas madeira de lei;
- b) Madeiras macias: provenientes em geral de árvores coníferas, de crescimento rápido [...]

O tipo de madeira vai influenciar, diretamente, a classe de resistência das peças estruturais, além de interferir no comportamento dos materiais diante das solicitações. A seção 2.3.2 apresenta algumas considerações sobre as propriedades mecânicas desses materiais e os aspectos que contribuem para a sua redução ou aumento.

### 2.3.2 Propriedades das peças estruturais

As propriedades físicas e mecânicas das peças de madeira são determinadas a partir de ensaios padronizados em amostras sem defeito. De acordo com a NBR 7190/1997, para a caracterização completa da madeira para o uso em estruturas, as seguintes propriedades devem ser determinadas por meio de ensaios:

- a) Resistência à compressão paralela às fibras  $f_c$  e normal às fibras  $f_{cn}$ ;
- b) Resistência à tração paralela às fibras  $f_t$  e normal às fibras  $f_{tn}$ ;
- c) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras  $f_v$ ;
- d) Resistência ao embutimento paralelo e normal às fibras  $f_e$ ;
- e) Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras  $E_c$ , e módulo de elasticidade na compressão normal às fibras  $E_{cn}$ ;

- f) Densidade básica,  $\rho_{bas}$ , que é a massa específica definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado; e densidade aparente  $\rho_{aparente}$ , calculada com a massa do corpo-de-prova a 12% de umidade.

Detalhes de cada um desses ensaios poderão ser vistos na NBR 7190/1997.

Apesar desses valores de resistências características serem determinados em corpos-de-prova sem defeitos, estes não retratam as propriedades mecânicas das peças de madeira, considerando que as mesmas serão afetadas pelos seguintes fatores:

- a) Posição da peça na árvore: A posição da peça na árvore influencia na resistência. A resistência da madeira é maior na base da árvore e nas camadas interiores do tronco, entre a medula e o anel médio;
- b) Umidade: De acordo com Pfeil & Pfeil (2003),

A umidade tem grande efeito sobre as propriedades das madeiras. Com o aumento da umidade, a resistência diminui até ser atingido o ponto de saturação das fibras; acima desse ponto, a resistência mantém-se constante[...]

Acima do ponto de saturação das fibras (30% de umidade), volume e o peso específico da madeira não são influenciados pelo grau de umidade, resultando numa resistência praticamente constante. Com a secagem da peça abaixo do ponto de saturação das fibras, observa-se redução de volume e aumento do peso específico e da resistência.

- c) Influência do tempo de duração da carga: Em geral, a resistência das peças para cargas de longa duração é menor, quando comparada à de peças quando rompidas sob impacto. De acordo com Foschi<sup>1</sup> (2000 *apud* PFEIL & PFEIL, 2003) a perda de resistência com o tempo de duração da carga pode ser encarada como um fenômeno de acumulação de danos, tal como a fadiga dos materiais sob cargas cíclicas, só que para a ação de cargas permanentes.

---

<sup>1</sup>FOSCHI, R.O.; Reliability applications in wood design, progress in structural engineering and materials, Vol.2, pp. 238-246, Jhn Wiley & Sons Ltd., UK, 2000.

Pelos aspectos acima apresentados, a resistência de cálculo será determinada a partir da minoração da resistência característica pelo fator  $k_{mod}$  que ajusta os valores da resistência características em função da influência de diversos fatores na resistência das peças estruturais. (ver item 2.3.4)

### 2.3.3 Estados limites e combinações de ações

Todas as considerações que foram feitas para os estados limites últimos e de utilização nas estruturas de concreto armado e de aço serão igualmente válidas para as estruturas de madeira.

Desta forma, os esforços solicitantes de cálculo serão determinados para diferentes combinações. As equações para o cálculo de  $F_d$  serão as mesmas apresentadas na seção 2.1.3. Porém, os coeficientes de majoração diferem e são apresentados nos quadros A9, A10 e A11 em anexo.

Com relação à resistência de projeto, esta será determinada a partir da seguinte equação:

$$f_d = k_{mod} \frac{f_k}{\gamma_w} \quad (67)$$

$$k_{mod} = k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3} \quad (68)$$

Onde:

$f_d$  – é a tensão resistente de projeto;

$k_{mod1}$  – leva em conta o tipo de produto de madeira empregado e o tempo de duração da carga; (quadros 4 e 5);

$k_{mod2}$  – considera o efeito da umidade; (quadros 6 e 7)

$k_{mod3}$  – leva em conta a classificação estrutural da madeira. (Quadro 8 e Quadro A12)

$\gamma_w$  – coeficiente de minoração da madeira, que leva em conta a variabilidade da resistência do material de um mesmo lote e demais diferenças (Quadro 9).

Quadro 4. Classes de carregamento

Classe	Período acumulado de tempo de atuação da carga variável de base de uma combinação de ações
Permanente	Vida útil da construção
Longa Duração	Mais de 6 meses
Média Duração	1 semana a 6 meses
Curta Duração	Menos de 1 semana
Duração instantânea	Muito curta

Fonte: PFEIL &amp; PFEIL (2003)

Quadro 5. Valores do coeficiente de ajuste  $k_{mod1}$ 

Classe de carregamento da combinação de ações	Madeira serrada, Madeira Laminada colada e Madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa Duração	0,70	0,45
Média Duração	0,80	0,65
Curta Duração	0,90	0,90
Duração instantânea	1,00	1,10

Fonte: PFEIL &amp; PFEIL (2003)

Quadro 6. Classes de Umidade

Classe de umidade	Umidade relativa do ambiente $U_{amb}$	Grau de umidade da madeira (equilíbrio com o ambiente)
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$85\% < U_{amb}$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: PFEIL &amp; PFEIL (2003)

Quadro 7. Valores do coeficiente  $k_{mod2}$ 

Tipo de produto de madeira		
Classe de Umidade	Madeira serrada, Madeira Laminada colada e Madeira compensada	Madeira recomposta
1 e 2	1,0	1,0
3 e 4	0,8	0,9

Fonte: PFEIL &amp; PFEIL (2003)

Quadro 8. Valores do Coeficiente  $k_{mod3}$ 

Produto de madeira	Tipo de madeira	Categoria	Kmod3
Serrada	Dicotiledônea	1 <sup>a</sup>	1
		2 <sup>a</sup>	0,8
	Conífera	1 <sup>a</sup> e 2 <sup>a</sup>	0,8

Fonte: Adaptada Pfeil & Pfeil (2003)

Quadro 9. Valores para os coeficientes de minoração

Esforço	$\frac{f_k}{f_m}$	$\gamma_m$
Compreensão paralela às fibras	0,7	1,4
Tração paralela às fibras	0,7	1,8
Cisalhamento paralelo às fibras	0,54	1,8

Fonte: PFEIL & PFEIL (2003)

#### 2.3.4 Dimensionamento à flexão simples: bases de cálculo

O dimensionamento será feito, basicamente, a partir da comparação entre os esforços solicitantes e tensões resistentes.

Na flexão simples, segundo a NBR 7190/1997 as vigas de madeira retangulares deverão ser verificadas conforme as tensões que se seguem:

- a) Tensões normais de flexão nos bordos mais comprimidos e mais tracionados:

$$\sigma_{td} = \frac{M_d}{W_t} = \frac{6M_d}{bh^2} \leq f_{td} \quad (69)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{M_d}{W_c} = \frac{6M_d}{bh^2} \leq f_{cd} \quad (70)$$

- b) Tensão de cisalhamento paralelo às fibras:

$$\tau_d = \frac{3V}{2bh} \leq f_{vd} \quad (71)$$

Onde:

$M_d$  – momento fletor solicitante de projeto;

$W_t, W_c$  – módulo de resistência à flexão referidos aos bordos tracionados e comprimidos, respectivamente;

$\sigma_{td}, \sigma_{cd}$  – é a tensão solicitante de projeto em relação ao bordo tracionado e comprimido;

$f_{td}, f_{cd}$  – é a tensão resistente de projeto em relação ao bordo tracionado e comprimido;

$b, h$  – dimensões da viga;

$\tau_d$  – tensão cisalhante máxima de projeto;

$f_{vd}$  – tensão cisalhante resistente de projeto

Com relação às dimensões das peças, a NBR 7190/1997 estabelece que para seções de peças principais, as dimensões mínimas serão: 5 x 10 cm e 50 cm<sup>2</sup> de área mínima.

No Quadro A13 (anexo) são fornecidas dimensões que são padrão para peças estruturais de madeira e que serão, desta forma, consideradas neste projeto.

## 2.4 Comportamento dos materiais em situação de incêndio

A exposição dos materiais estruturais, tais como aço, madeira e concreto armado a altas temperaturas faz com que haja a modificação de inúmeras propriedades físicas e químicas dos mesmos, causando a redução de suas resistências e do módulo de elasticidade. Tais condições devem ser consideradas no dimensionamento das estruturas. As formulações que serão apresentadas nos itens 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3 farão considerações acerca do cálculo das resistências e esforços solicitantes dos materiais em situação de incêndio.

De acordo com PINTO & CALIL JÚNIOR (2004):

“Entende-se por dimensionamento em situação de incêndio a verificação dos elementos estruturais e suas ligações, com ou sem proteção contra incêndio, no que se refere à estabilidade e à resistência aos esforços solicitantes em temperatura elevada, a fim de evitar o colapso da estrutura em um tempo inferior àquele necessário para possibilitar a fuga dos usuários da edificação e, quando necessário, a aproximação e o ingresso de pessoas e equipamentos para as ações de combate ao fogo.”

### 2.4.1 Concreto armado

Assim como foi considerado nas combinações normais e de construção, na combinação excepcional, a segurança estrutural estará garantida desde que os esforços solicitantes sejam inferiores as resistências dos materiais. Ou seja,

$$S_d \leq R_d \quad (72)$$

Em situação de incêndio a inequação 72 toma a forma de:

$$S_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (73)$$

Onde:

$S_d$  e  $R_d$  são, respectivamente, o valor do esforço de cálculo e do esforço resistente em situação normal de carregamento;

$S_{d,fi}$  e  $R_{d,fi}$  são, respectivamente, o valor do esforço de cálculo e do esforço resistente em situação de incêndio.

Para a situação de incêndio, o cálculo do esforço solicitante de cálculo é determinado através da Equação 2, cujos coeficientes de majoração das cargas se encontram definidos o Quadro A4 (anexo).

O cálculo do esforço solicitante em situação de incêndio é feito através da seguinte expressão:

$$F_{d,fi} \leq \eta_{fi} * F_d \quad (74)$$

$$\eta_{fi} = \frac{1,2 + 0,7x\psi_2x\xi}{1,4x(1 + \xi)} \quad (75)$$

$$\xi = \frac{F_{Qk}}{F_{Gk}} \quad (76)$$

Onde,

$F_{d,fi}$  é o valor do esforço calculado através da Equação 2;

$F_d$  é o valor de cálculo da ação à temperatura ambiente, desconsiderando-se os efeitos decorrentes da ação do vento;

$F_{Qk}$  é o valor característico das ações variáveis;

$F_{Gk}$  é o valor característico das ações permanentes;

$\psi_2$  é o valor do coeficiente utilizado para a determinação dos valores reduzidos das ações variáveis, conforme a Quadro A3 (anexo). A ABNT NBR 8681/2004 recomenda que nas situações de incêndio o valor  $\psi_2$  seja reduzido para  $\psi_2 0,7$ .

No que se refere ao cálculo do valor característico do esforço resistente do elemento estrutural de concreto e do aço do concreto armado em situação de incêndio, serão consideradas as equações 77 e 78:

$$fck_{\theta} = \frac{fck}{\gamma_{c,fi}} \quad (77)$$

$$fyd_{\theta} = \frac{fyk}{\gamma_{s,fi}} \quad (78)$$

Em situação de incêndio, a ABNT NBR 15200/2012 recomenda adotar  $\gamma_{c,fi}$  e  $\gamma_{s,fi}$  iguais a 1,0.

## 2.4.2 Aço

Para a determinação dos esforços solicitantes em situação de incêndio das estruturas de aço, a Equação 2 será igualmente utilizada, considerando-se os coeficientes adequados de majoração, conforme apresentados no Quadro A7.

Conforme recomendações da NBR 14323/2003, os esforços resistentes de cálculo para barras não-esbeltas deverão ser calculados através das seguintes equações:

a) Para FLM e FLA:

$$M_{fi,Rd} = M_{pl} \times k_{y,\theta} \times \kappa \text{ para } \lambda \leq \lambda_{p,fi} \quad (79)$$

$$M_{fi,Rd} = \kappa \times k_{y,\theta} \times W \times f_y, \lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi} \quad (80)$$

$$M_{fi,Rd} = \kappa \times k_{\sigma,\theta} \times W \times f_y, \text{ para } \lambda > \lambda_{r,fi} \quad (81)$$

A Equação 81 não é válida para o FLA, ficando o cálculo de suas variáveis dependente da consulta do anexo H da NBR 8800/2008.

b) Para o FLT tem-se a seguinte condição: todos os elementos são considerados travados e tal verificação não foi aqui abordada. Mas toda a metodologia de cálculo se encontra detalhadamente apresentada no item 8.4.3.2.2 da NBR ABNT 8800/2008.

Onde:

$k_{y,\theta}$  é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura  $\theta_a$ , conforme apresentado no Quadro A14 (anexo);

$k_{\sigma,\theta}$  é o fator de redução para a resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local apresentado no Quadro A15 (anexo);

$\kappa$  é o fator de correção para temperatura não-uniforme na seção transversal, tomado como 1,0 para vigas com todos os quatro lados expostos, 1,4 para vigas com material de proteção contra incêndio com três lados exposto e 1,15 para vigas sem material de proteção contra incêndio com três lados exposto;

$\lambda_{p,fi}$  e  $\lambda_{r,fi}$  são, respectivamente,  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  multiplicados pelo fator 0,85.

Os demais fatores de cálculo foram anteriormente definidos.

### 2.4.3 Madeira

No Brasil o dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio é previsto por norma e contempla materiais como o aço e concreto. A madeira, no entanto, não possui ainda um documento normativo apreciando este assunto. A formulação que será aqui apresentada, que faz considerações acerca dos elementos estruturais de madeira em situação de incêndio foi apresentada a Comissão de estudos a ABNT por ocasião dos trabalhos de revisão da atual NBR 7190/1997.

Busca-se com isso fixar as condições básicas exigíveis para o dimensionamento em situação de incêndio de elementos estruturais de madeira visando atender aos requisitos necessários para evitar o risco à vida. Ele se aplica onde a resistência mecânica das peças estruturais de madeira exposta a situação de incêndio seja necessária, devendo ser projetadas e construídas de modo a manter a função de suportar carregamento durante o período de exposição ao fogo.

De acordo com PINTO & CALIL JÚNIOR (2004):

“A madeira apresenta bom desempenho contra incêndio, quando comparada a outros materiais estruturais. As peças robustas formam uma camada de carvão isolante impedindo a saída de gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da seção resultando em uma velocidade média de carbonização de 0,63 mm/min ( $\pm 0,13$ ), colaborando favoravelmente para a capacidade de sustentação estrutural mesmo após ter sido exposta a elevadas temperaturas, pois a alma da seção se

mantém fria a apenas uma pequena distância da zona queimada, conservando grande parte das propriedades físicas da madeira.”

A Equação 82 fixa as propriedades resistentes da madeira em situação de incêndio, cujos coeficientes apresentados levam em consideração a redução das propriedades de resistência e rigidez da madeira a temperatura elevadas:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \times f_{o2} / \gamma_{M,fi} \quad (82)$$

Onde:

$k_{mod,fi}$  é o coeficiente de modificação para incêndio, que substitui o fator de modificação a temperatura normal;

$f_{o2}$  é a fração de 20% da propriedade de resistência a temperatura normal;

$\gamma_{M,fi}$  é o coeficiente de ponderação para madeira em incêndio, cuja recomendação é a adoção do valor 1,0.

Recomenda-se, pois que os valores para a resistência de projeto sejam calculados pela formulação:

$$R_{d,fi} = \eta \frac{R_{0,2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (83)$$

$$\eta = \frac{G_k + \psi_{fi} \times Q_{k,1}}{\xi \times \gamma_G \times G_k + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1}} \quad (84)$$

Onde:

$R_{d,fi}$  são valores projetados de resistência mecânica a um tempo  $t$ ;

$R_{0,2}$  é a fração referente a 20% da resistência mecânica a temperatura normal sem o efeito de duração de carga e umidade (=1);

$\eta$  é um coeficiente de ponderação para a perda de capacidade de carregamento em incêndios.

$\xi$  é o coeficiente de redução para ações permanentes desfavoráveis G.

O valor de cálculo das ações solicitantes será calculado a partir da Equação 2, com a utilização dos coeficientes de majoração para combinações excepcionais.

## 2.5 Análise de custos dos materiais: Precificação

O objetivo principal deste trabalho, assim como já foi apresentado, é permitir uma comparação entre os dimensionamentos obtidos para o 3 (três) materiais estudados. Tal comparação se refere não só a capacidade resistente de cada um deles, mas também ao custo da utilização dos mesmos.

Para a precificação dos materiais foram utilizadas diferentes plataformas de consulta.

No caso do concreto (inclusive formas) e do aço para concreto armado, foram utilizados o SINAPI (base de dados de junho de 2017) e as tabelas do SEINFRA-CE. Para o concreto e aço foram considerados tipos variados de bitolas e fck's, mas para as formas foi considerado apenas o tipo "madeira compensada plastificada de 18mm".

Para o aço dos Perfis Metálicos utilizou-se a plataforma "Gerador de Preços" e a base de preços da Acelor Mittal, onde foram encontrados os custos relativos aos dois tipos de aço considerados neste trabalho: ASTM A36 e ASTM A572 G50.

No caso da madeira, a busca por preços precisou ser mais rigorosa, devido à variedade de espécies comerciais disponíveis. Para a precificação deste material foi utilizada tanto a plataforma "Gerador de Preços", quanto o *site* de fornecedores, locais ou nacionais.

Os valores finais para a composição de cada um dos materiais podem ser vistos nas tabelas que constam no **Apêndice A**.

### **3 METODOLOGIA**

Neste capítulo será apresentada a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho em questão, que consistiu da análise comparativa entre as vigas de concreto armado, madeira e aço.

#### **3.1 Revisão bibliográfica**

A pesquisa Bibliográfica teve embasamento teórico principalmente na obra de ARAÚJO (2014), CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO (2014), PFEIL & PFEIL (2009), PFEIL & PFEIL (2003), PINHEIRO (2010), além das normas técnicas em conformidade com cada material estudado e demais autores que são citados na seção de referências bibliográficas; tal etapa teve como objetivo aprofundar os conhecimentos em concreto armado, aço e madeira, a fim de que fosse fornecida a base necessária, em termos de comportamento estrutural dos materiais, para o desenvolvimento da rotina de cálculo e posterior desenvolvimento do código em *Visual Basic*.

#### **3.2 Desenvolvimento da rotina de cálculo**

A rotina de cálculo foi desenvolvida com base nos conhecimentos adquiridos na etapa anterior. A formulação para a resolução dos problemas propostos foi desenvolvida a partir das características e particularidades de cada material.

#### **3.3 Desenvolvimento do código computacional e validação dos resultados**

Desenvolveu-se o código computacional (Concremaço<sup>®</sup>) a fim de auxiliar no dimensionamento dos elementos desejados: e assim, alcançar o objetivo geral deste trabalho; para tanto, foi utilizada a linguagem de programação *Visual Basic*, com o auxílio da interface da *Microsoft Visual Studio*. Mais detalhes sobre a linguagem e código computacional desenvolvido serão fornecidos na próxima seção.

Antes de se prosseguir com a utilização do código para a análise comparativa entre os materiais estruturais foi necessária a validação dos resultados e teste do programa desenvolvido, que foi feita a partir de *softwares* comerciais de cálculo estrutural e também pelo método analítico.

### **3.4 Análise comparativa**

Esta etapa foi executada através da utilização do código desenvolvido e análise dos resultados por ele fornecidos. No que se refere a análise dos custos, foram utilizadas planilhas orçamentárias padronizadas para a precificação dos quantitativos de materiais obtidos com o programa (vem Item 2.5).

## **4 O CÓDIGO COMPUTACIONAL**

### **4.1 A Linguagem *Visual Basic***

A linguagem de programação escolhida para este trabalho foi o *Visual Basic*, que é um aperfeiçoamento da linguagem *Basic*, ambas desenvolvidas pela *Microsoft*. A mesma possui características que a tornam uma ferramenta de trabalho atrativa e versátil, além de ser, relativamente de fácil utilização. Possui um ambiente de programação bem concebido e permite, ainda, o desenvolvimento de uma interface gráfica de interação bastante eficaz com o usuário. Além disso, traz a possibilidade de trabalho com banco de dados, tornando viável o armazenamento e análise de uma grande quantidade de informações.

### **4.2 Concremaço<sup>®</sup> 1.0 versão *beta***

Conforme apresentado em etapas anteriores deste TCC, o objetivo do programa desenvolvido (Concremaço<sup>®</sup>) foi permitir uma comparação no que se refere ao dimensionamento de seções de viga em concreto armado, madeira e aço, para uma mesma solicitação, além de uma estimativa do custo de cada material.

#### **4.2.1 Rotinas de cálculo**

A rotina de cálculo descrita nessa etapa teve como principal base a formulação para cada material, que foi apresentada na etapa de referencial teórico.

#### **4.2.2 Apresentação do Programa: Manual de utilização**

Aqui será apresentado o passo-a-passo para a utilização do programa e as suas principais recomendações, visando a obtenção dos resultados corretos e o seu funcionamento adequado.

### a) Página inicial

Nesta página poderão ser vistas as informações gerais do programa, seu objetivo, logomarca, responsável pela criação e professores orientadores. Ele foi desenvolvido no ambiente do Grupo de Pesquisa em Modelagem da Informação na Construção e Experimentação e Modelagem de Estruturas (MIMEE), do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), cujo logotipo também é apresentado na página inicial. O acesso à página seguinte poderá ser feito ou a partir da seleção das abas superiores ou pela seleção do botão “Avançar” no canto inferior direito.

Figura 5. Página inicial do Concremaço®



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### b) Aba Cargas:

Nesta aba o usuário poderá fornecer as informações em termos de carregamento. O comprimento do elemento calculado também deverá ser fornecido, além do tipo de edificação considerado, e respectiva temperatura do ambiente onde a construção será inserida. Tais

informações serão necessárias para a montagem das combinações de cálculo e respectivas verificações em condição de incêndio. Assim como ocorrerá nas demais abas, o usuário não poderá avançar para a página seguinte ou selecionar qualquer uma das abas superiores a menos que preencha todos os campos apresentados. (Ver mensagem na Figura 7). Caso o usuário tenha dúvidas durante o preenchimento, ao passar o mouse sobre todos os campos, poderão ser vistas dicas de preenchimento e informações acerca das variáveis. No botão “Informações ao usuário” também são apresentadas informações gerais de preenchimento/dimensionamento e indicação de referências normativas que poderão ser úteis.

As facilidades como “mensagens de dicas” e botão de “informações ao usuário” estão igualmente disponíveis nas abas “Concreto Armado”, “Aço” e “Madeira”.

Figura 6. Aba cargas

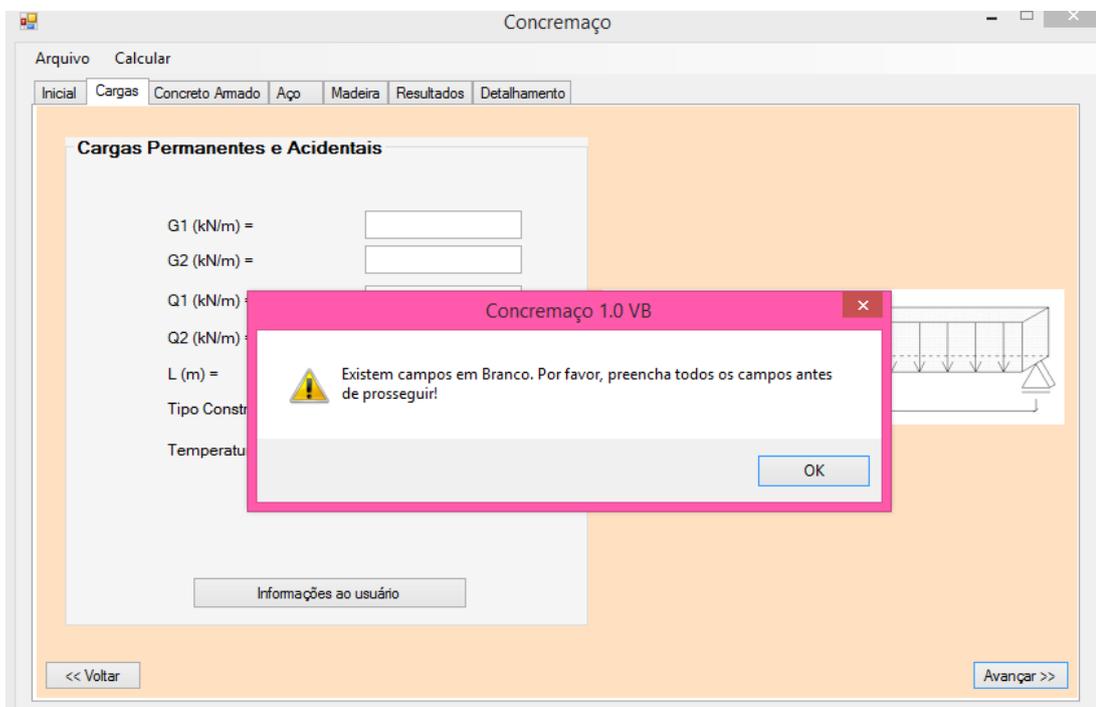
Fonte: Elaborado pelo Autor.

No que refere às variáveis a serem preenchidas nesta aba, tem-se:

- **G1, G2, Q1 e Q2:** Que são, as cargas permanentes 1 e 2 e as cargas acidentais 1 e 2, que deverão ser fornecidas em kN/m.

- **L:** Comprimento efetivo da viga ou de comprimento de travamento (Para o caso de vigas de aço e madeira). Deverá ser fornecido em metro.
- **Tipo de construção:** Poderá ser selecionada a opção “Residencial”, “Comercial” ou “Depósitos”. Tal informação é importante para a escolha do coeficiente de minoração de cargas variáveis no caso de existirem mais de uma carga.
- **Temperatura:** Deverá ser fornecida para o caso das verificações de incêndio. Se não existirem riscos de elevação de temperatura, o usuário poderá preencher, simplesmente, a opção 20°C (Consideração de temperatura ambiente).

Figura 7. Mensagem de advertência para o preenchimento de informações



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### c) **Aba Concreto:**

Esta aba é destinada à definição das variáveis para o dimensionamento de vigas em concreto armado. Nesta aba também são válidas as opções de “botão informação” e de mensagens informativas sobre os campos a serem preenchidos. Caso o usuário esqueça de preencher qualquer informação solicitada, estará impossibilitado de avançar para a aba seguinte.

Figura 8. Aba Concreto Armado

Fonte: Elaborado pelo Autor.

No que refere às variáveis a serem preenchidas nesta aba, tem-se:

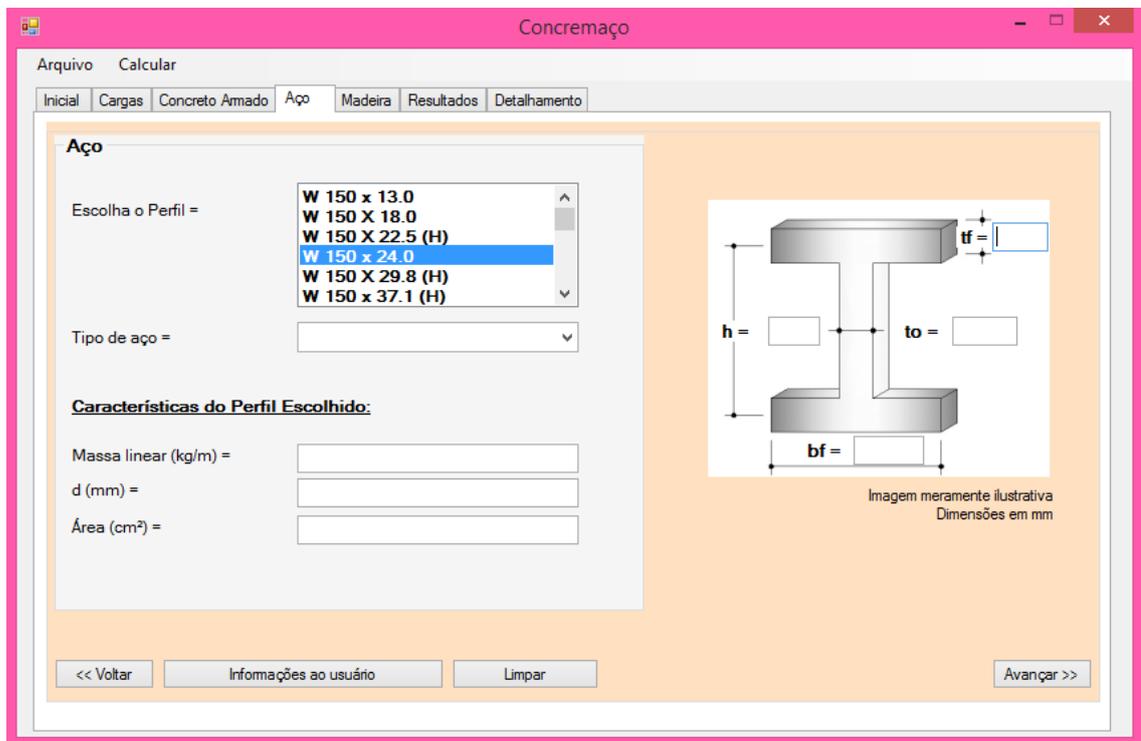
- **H e B:** Que são as dimensões da seção estrutural da viga. Deverão ser fornecidas em cm.
- **Tipo de aço e fck:** Que se referem às características de resistência do aço e concreto respectivamente.
- **Armadura longitudinal, transversal e classe de agressividade:** Definidos a fim de se obter a altura útil de cálculo da armadura.
- **Posição Linha Neutra:** São fornecidas duas opções de escolha para o usuário, que são: Dimensionamento conforme NBR 6118/2014 e CEB/90. A escolha do critério determinará a posição da linha neutra e a seção de armadura calculada no caso de armadura dupla.

O botão “Limpar” no canto inferior fornece ao usuário a opção de limpar todos os dados até então fornecidos na aba considerada. Tal opção é válida para todas as outras abas.

#### d) Aba Aço:

Esta aba é destinada a definição das variáveis para o dimensionamento de vigas em Perfis Metálicos.

Figura 9. Aba Aço



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No que refere as variáveis a serem preenchidas nesta aba, tem-se:

- **Escolha do Perfil de aço:** A escolha do Perfil será realizada através do acesso ao banco de dados de perfis da Gerdau que foi cadastrado por meio de um bloco de notas (ver perfis cadastrados no Quadro A16 em anexo). A escolha de um determinado elemento já permite o preenchimento dos campos: massa linear, d, Área, h, tf, to e bf, que estão diretamente vinculados ao mesmo. Caso o usuário queira cadastrar um perfil diferente, basta acessar a base de dados e reiniciar o programa. É importante que o usuário alimente as informações mantendo a mesma formatação que é apresentada no bloco de notas, que se constitui como a base de dados do programa; caso contrário, ocorrerá erro de compilação e os resultados obtidos não serão conforme esperados.
- **Tipo de aço:** Tal escolha determinará as propriedades de resistência do aço estrutural a serem consideradas no dimensionamento.

### e) Aba Madeira

Esta aba é destinada a definição das variáveis para o dimensionamento de vigas em Madeira.

Figura 10. Aba Madeira

Fonte: Elaborado pelo Autor.

- **Escolha da Espécie de Madeira:** A escolha da Espécie de madeira será realizada através do acesso ao um banco de dados de espécies, que foi extraído da NBR 7190/1997 e cadastrado por meio de um bloco de notas. A escolha de um determinado elemento já permite o preenchimento dos campos: Tipo de Madeira, Peso Específico, Compressão, Cisalhamento, Tração, M. Elasticidade, b e h, todos estes relacionados às características estruturais dos elementos. Caso o usuário queira cadastrar uma espécie diferente, basta acessar a base de dados e reiniciar o programa.
- **Classe de carregamento, classe de umidade e Categoria estrutural:** Tal escolha determinará as condições necessárias para a montagem das resistências de cálculo das peças.

Após o preenchimento das informações para os três materiais é possível dar continuidade ao dimensionamento, utilizando ou o botão calcular no canto inferior direito da Aba Madeira ou o que está no canto superior esquerdo do formulário geral.

#### **f) Aba resultados, detalhamento, comparativo e relatórios**

Na Aba resultados é possível acessar os valores de dimensionamento para os três materiais e respectivos custos. Por meio desta aba também é possível ter acesso aos botões “Relatório”, “Reinicializar Cálculos”, “Comparativo” e “Detalhamento”, que fornecem, respectivamente, os valores de cálculo encontrados após o dimensionamento tanto nas combinações normais quanto de incêndio, a possibilidade de limpar os campos e recomeçar os cálculos, um comparativo acerca da viabilidade de emprego de cada material e um detalhamento das seções.

Ainda nesta aba, em situações extremas de dimensionamento, como no caso de valores de carga muito grandes ou materiais com capacidades insuficientes para a situação apresentada, é possível visualizar mensagens de advertência, como sugestão ao usuário para a mudança de parâmetros de cálculo e reinicialização do dimensionamento.

No caso de concreto, as mensagens de advertência surgem quando a seção é superarmada, diante dos parâmetros pré-definidos de cálculo. Para seções de aço, como o banco de dados cadastrado corresponde apenas a perfis laminados, a mensagem sugere a adoção de perfis soldados, caso os produtos disponíveis não sejam suficientes. No caso da madeira, a mensagem é semelhante à do aço, sugerindo a mudança de parâmetro de cálculos ou de atualização do banco de dados.

É importante lembrar que o acesso ao detalhamento só será permitido depois que o usuário escolher as armaduras que comporão as peças detalhadas.

Figura 11. Página Aba Resultados

The screenshot shows the 'Concretação' software interface with the 'Resultados' tab selected. The interface is divided into three main sections: Concreto, Aço, and Madeira. Each section has 'Dimensionamento' and 'Custo' sub-sections with input fields and 'Total (RS)' labels. A dialog box titled 'Concretação 1.0 VB' is overlaid on the center, displaying an information icon and the message: 'Cálculos realizados com sucesso! Verifique os resultados!' with an 'OK' button.

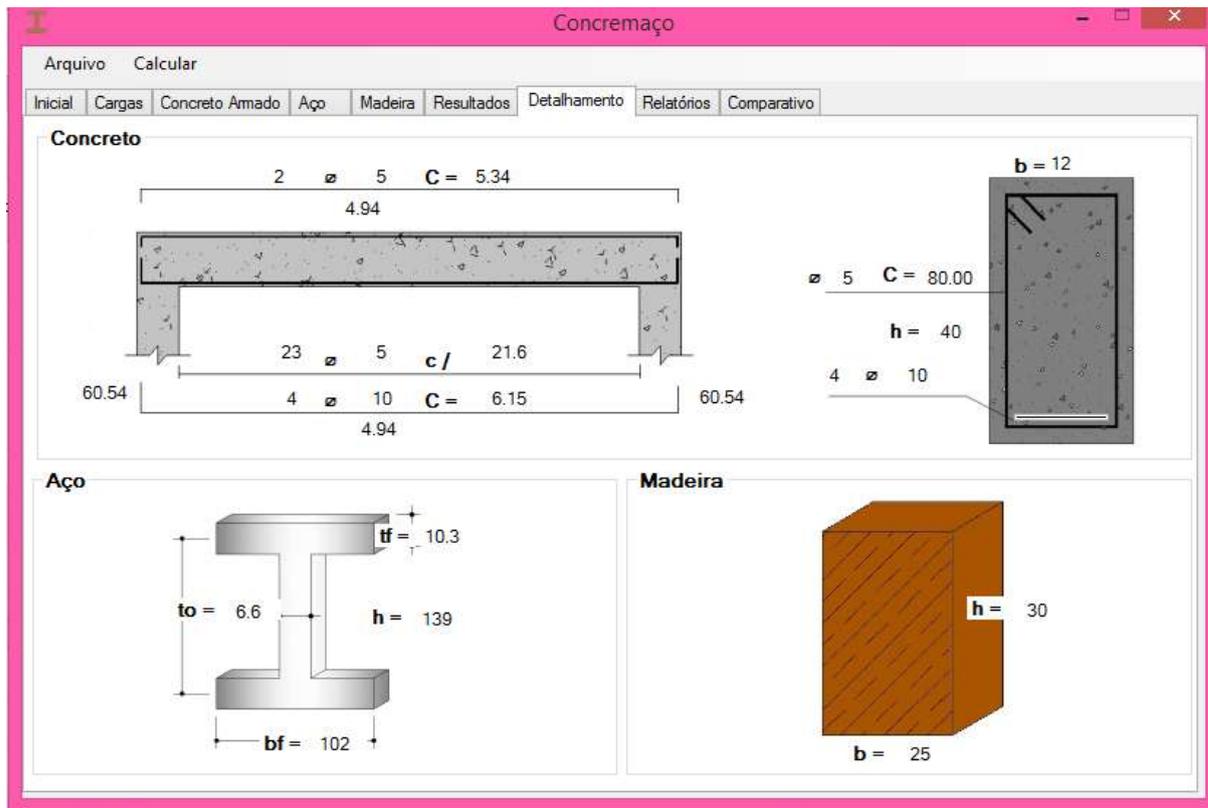
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 12. Mensagem de advertência para a escolha das bitolas

The screenshot shows the 'Concretação' software interface with the 'Resultados' tab selected. The interface is divided into three main sections: Concreto, Aço, and Madeira. Each section has 'Dimensionamento' and 'Custo' sub-sections with input fields and 'Total (RS)' labels. A dialog box titled 'Concretação 1.0 VB' is overlaid on the center, displaying a warning icon and the message: 'Escolha um tipo de armadura a ser usado no detalhamento!' with an 'OK' button. The background form shows numerical values: Concreto (As: 3.19, As': 0.00, Asw: 1.42, Concreto: 0.24, Aço L: 0.00, Aço T: 0.00, Formas: 0.00, Total: 62.37), Aço (Perfil: W 150 X 18, Massa: 18, Total: 367.20), and Madeira (Perfil: Pinus taeda L. (25x30), Massa: 645, Madeira: 0.38, Total: 431.43).

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 13. Aba Detalhamento



Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 4.2.3 Exemplo de cálculo 1

A presente seção terá como finalidade ilustrar o funcionamento do programa, através de um exemplo numérico, que será tanto utilizado na etapa de validação dos resultados, quanto na etapa de discussões e considerações finais deste trabalho:

Foram considerados os seguintes parâmetros para o cálculo:

#### Cargas:

$$G_1 = 8 \text{ kN/m};$$

$$G_2 = 0$$

$$Q_1 = 1 \text{ kN/m};$$

$$Q_2 = 0;$$

$$L = 5 \text{ m};$$

Tipo de edificação: Residencial;

Temperatura: 20°C;

**Concreto armado:**

$$H = 40 \text{ cm};$$

$$B = 12 \text{ cm};$$

Para o cálculo de  $d$ :  $\phi_l = 10.0$ ,  $\phi_t = 5.0$ , *classe de agressividade II*;

$$f_{ck} = 25 \text{ Mpa};$$

$$f_{yk} = 500 \text{ Mpa};$$

Linha neutra = NBR 6118/2014;

**Aço:**

Tipo de aço = ASTM A572 G50

Os demais parâmetros de cálculo serão determinados através de iterações do programa, que serão executadas até que seja obtido o dimensionamento ótimo;

**Madeira:**

Classe de carregamento: Permanente;

Classe de umidade: Classe 1;

Categoria estrutural: 1ª categoria;

Os demais parâmetros de cálculo serão determinados através de iterações do programa, que serão executadas até que seja obtido o dimensionamento ótimo;

**Os resultados obtidos foram:**

Figura 14. Exemplo de funcionamento do Concremaço®

The screenshot shows the 'Concremaço' software interface with the 'Resultados' (Results) tab selected. The interface is divided into three main sections: Concreto (Concrete), Aço (Steel), and Madeira (Wood). Each section displays dimensioning and cost data.

Concreto			
Dimensionamento		Custo	
As (cm <sup>2</sup> ) =	3.19	10.0	
As' (cm <sup>2</sup> ) =	0.00		
Asw (cm <sup>2</sup> /m) =	1.42	5.0	
<b>Total (R\$):</b>	<b>612.39</b>		
Aço			
Dimensionamento		Custo	
Perfil Escolhido =	W 150 x 24.0	Aço (kg) =	120.00
Massa (kg/m) =	24	Unit. (R\$/kg) =	4.08
		Total (R\$) =	489.60
Madeira			
Dimensionamento		Custo	
Perfil Escolhido =	Pinus taeda L. (25x30)	Madeira (m <sup>3</sup> ) =	0.38
Massa (kg/m <sup>3</sup> ) =	645	Unit. (R\$/m <sup>3</sup> ) =	1135.35
		Total (R\$) =	431.43

At the bottom of the interface, there are four buttons: 'Reinicializar Cálculos', 'Relatórios/ Considerações de incêndio', 'Comparativo', and 'Detalhamento'.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 4.2.4 Validação dos resultados

A validação dos resultados obtidos pelo programa foi feita através de duas etapas:

1. Validação analítica, através da aplicação das fórmulas utilizadas no dimensionamento e respectiva conferência dos valores obtidos (Ver passo-a-passo de cálculo nos Apêndices);
2. Validação através de *Softwares* conhecidos de dimensionamento: para a validação do dimensionamento do concreto armado foi utilizado o *TQS*, através da chave de acesso do professor orientador ; já para o aço e madeira, foi utilizado o *Cype3D em sua versão after hours*, que é disponibilizada pela *CYPE Ingenieros*, numa iniciativa sem precedentes no mundo da informática, com limitações horárias de utilização. A *Versão After Hours* permite trabalhar livremente com todos os programas da “*CYPE Ingenieros*” entre as 22:00 horas e as 08:00 horas de segunda a sexta e durante todo o dia aos sábados e aos domingos.

Acerca das validações é possível fazer as seguintes considerações:

### a) Concreto Armado

**Validação através do método analítico:** Os resultados obtidos pelo Concremaço® e pelo método analítico foram exatamente os mesmos. Foi obtido um  $A_s = 3,19 \text{ cm}^2$ ,  $A'_s = 0$ ,  $A_{sw} = 1,42 \text{ cm}^2/\text{m}$  e  $M_d = 44,625 \text{ kN.m}$ . Como a rotina de cálculo e código do programa foi desenvolvido diretamente através da metodologia analítica de cálculo, tal resultado já era esperado.

**Validação através do TQS:** Os resultados obtidos pelo TQS foram bem próximos aos encontrados pelo Concremaço®. Foi obtido um  $A_s = 3,31 \text{ cm}^2$ ,  $A'_s = 0$ ,  $A_{sw} = 1,2 \text{ cm}^2/\text{m}$  e  $M_d = 44,8 \text{ kN.m}$ . Desta forma, encontrou-se uma variação de menos de 4 % em cada um dos resultados (Ver ANEXO B).

Pode-se, pois, dizer, que os resultados obtidos para o concreto através da ferramenta desenvolvida podem ser validados.

### b) Aço

**Validação através do método analítico:** Por meio do método analítico o valor de momento resistente e característicos encontrados foram muito próximos aos apresentados pelo programa, resultando, pois, na escolha do mesmo perfil sugerido pelo mesmo. O perfil W150x24 é o primeiro perfil dentre os cadastrados no banco de dados que possui  $M_{Rd} > M_{sd}$  e sendo o que possui a menor massa, quando comparado aos demais que aparecem na sequência, mostra-se, pois como o mais econômico, conforme conclusão do próprio Concremaço®.

**Validação através do Cype3D:** O Cype3D apresentou uma série de perfis como sendo adequados ao dimensionamento, mas o de menor massa dentre todos os que foram apresentados foi o W150x24, chegando a mesma conclusão do Concremaço® (ver ANEXO C).

Pode-se, pois, dizer, que os resultados obtidos para o aço através da ferramenta desenvolvida podem ser validados.

A sequência completa de verificações e consequente validação dos resultados obtidos são apresentados nos Apêndices e Anexos.

c) **Madeira**

**Validação através do método analítico:** Através do método analítico o valor de momento resistente e característicos encontrados foram muito próximos aos apresentados pelo programa (Ver apêndice G), correspondendo, pois, a escolha da mesma espécie de madeira.

**Validação através do *Cype3D*:** A tentativa de validação dos resultados encontrados para a madeira foi feita no *Cype3D* através do cadastro da seção de madeira sugerida pelo Concremaço<sup>®</sup>. Mesmo com o cadastro da seção, o *Cype3D* não apresentou a opção de verificação da mesma, indicando a condição de “perfil não-encontrado”. Neste sentido, a validação dos resultados para as vigas de madeira só foi realizada através do método analítico.

A sequência completa de verificações e consequente validação dos resultados obtidos são apresentados nos Apêndices F e G.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com relação a validação dos resultados, verifica-se que o Concremaço<sup>®</sup> devolve valores válidos para o dimensionamento dos Perfis em concreto Armado, Madeira e Aço, sendo, pois, uma ferramenta viável para a análise da custo-benefício entre os materiais.

Para análise do custo entre os materiais estudados foi utilizada a seguinte rotina: Primeiramente foram admitidos os mesmos parâmetros de cálculo para concreto armado, madeira e aço que estão apresentados no exemplo 1, mudando-se apenas o comprimento do vão de viga e da altura das seções de concreto, que foram inicialmente definidas a partir das condições de pré-dimensionamento, que considera, para vigas biapoiadas, 1/10 do comprimento entre apoios. No estudo em questão, foram considerados valores de vãos ente 1 e 15 metros. Vale ressaltar que os valores de cargas NÃO foram modificados. As alturas das vigas eram modificadas sempre que a seção de concreto apresentava condições de “Superarmadas”.

Desta forma, foi possível obter os valores limites para os quais cada um dos materiais são mais ou menos econômicos.

Após a compilação do programa para cada comprimento de vão, os seguintes resultados foram obtidos:

- Para vãos variando de 1 a 5 metros os resultados obtidos para cada uma das vigas foram próximos, mas o aço se apresentou como mais vantajoso nos primeiros 4 metros. Nesta condição de vão, os valores de alturas de vigas de concreto variaram entre 10 e 30 cm, para as vigas de aço foram sempre encontrados valores de 15 cm e para as vigas de madeira, de 30 cm.
- Para vãos de 6 e 7 metros, as vigas de concreto e madeira se mostraram como mais econômicas.
- Após 7 metros de vão, as seções de madeira cadastradas no programa se mostraram insuficientes às solicitações superiores, e, a partir daí, as comparações continuaram sendo feitas apenas entre o concreto e o aço;
- Após 9 metros de vão, os valores obtidos para o concreto, em termos de custos eram sempre inferiores aos obtidos para o aço; um comparativo acerca do custo obtido por meio do Concremaço<sup>®</sup> é apresentado na Tabela 2 e Figura 15.

- Conforme mencionado acima, a medida que o Concremaço® apresentava mensagens de advertência para o fato das seções de concreto se comportarem como superarmadas, as alturas das mesmas eram modificadas e a análise prosseguiu até os 15 metros. As seções de vigas que foram dimensionadas para cada material em função do vão estudado são apresentadas na Figura 16 e Tabela 3.
- Além do comparativo no que se refere ao custo e altura dos materiais estruturais, também foi feito um estudo no que se refere ao peso de viga para cada elemento considerada, que é apresentado na Tabela 4 e Figura 17.

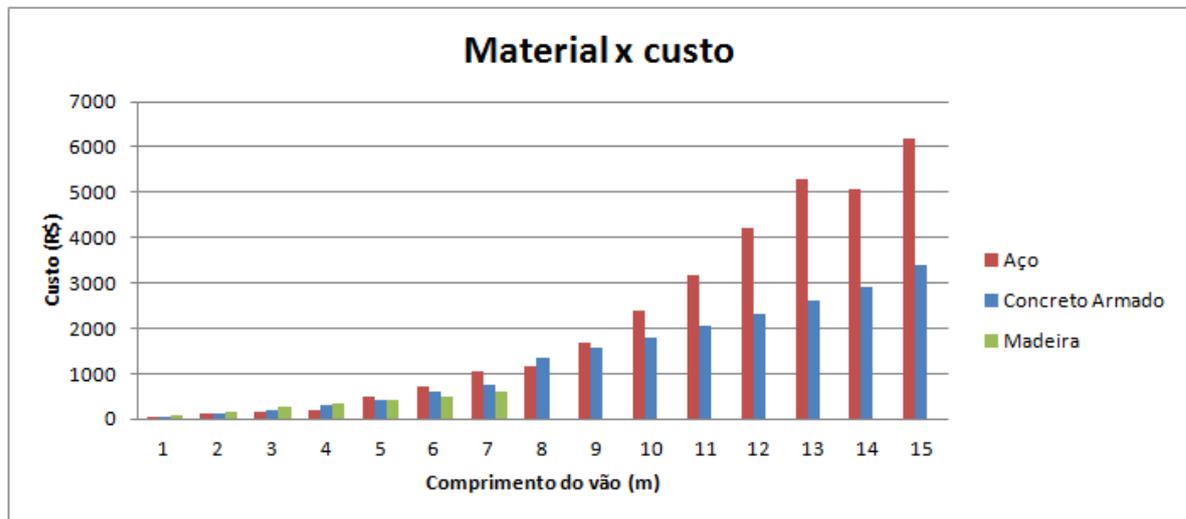
Tabela 2. Comparativo entre os materiais para os custos apresentados pelo Concremaço®

Custo x comprimento do vão			
Comprimento (m)	Concreto Armado	Aço	Madeira
	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)
1	55,76	53,04	90,83
2	135,06	106,08	170,3
3	197,39	159,12	261,13
4	296,69	212,16	340,61
5	414,07	489,6	431,43
6	588,73	729,5	510,91
7	743,73	1059,58	601,74
8	1357,68	1171,78	x
9	1564,09	1692,79	x
10	1809,24	2407,2	x
11	2056,98	3186,48	x
12	2322,71	4210,56	x
13	2610,33	5304	x
14	2915,44	5083,68	x
15	3391,67	6181,2	x

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 15 apresenta o mesmo comparativo fornecido pela Tabela 2.

Figura 15. Comparativo de custos apresentados pelo Concremaço<sup>®</sup>, diante do dimensionamento dos materiais



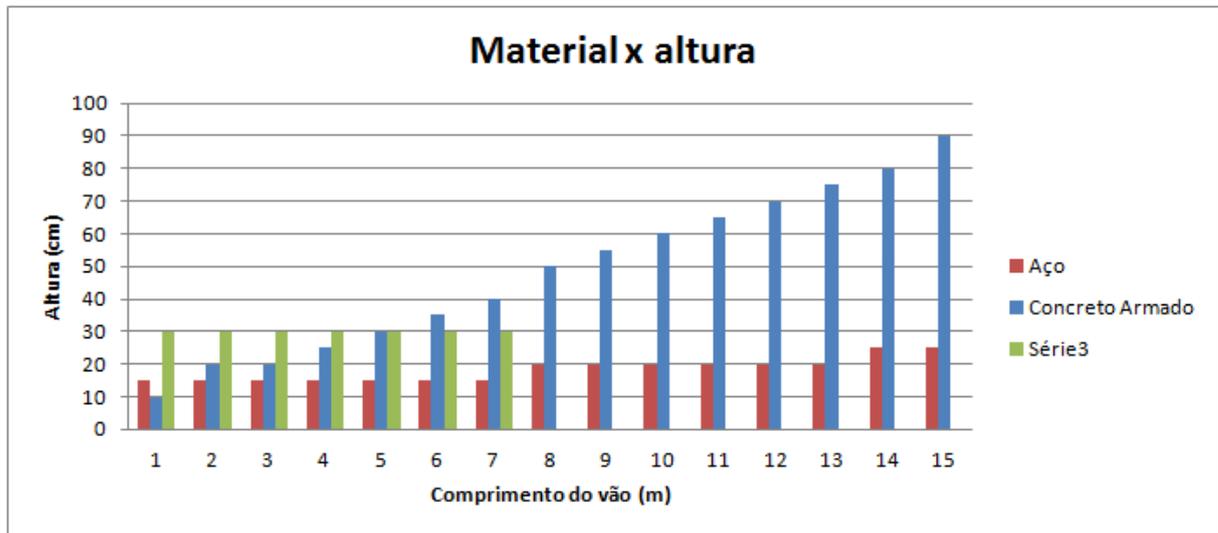
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3. Comparativo entre as alturas de vigas obtidas após o dimensionamento pelo Concremaço<sup>®</sup>

Comprimento (m)	Altura x comprimento do vão					
	Concreto Armado		Aço		Madeira	
	Altura (cm)	Seção (cm)	Altura (cm)	Perfil (mm)	Altura (cm)	Seção (cm)
1	10	10x12	15	W 150 X 13	30	25 x 30
2	20	20x12	15	W 150 X 13	30	26 x 30
3	20	20x12	15	W 150 X 13	30	27 x 30
4	25	25x12	15	W 150 X 13	30	28 x 30
5	30	30x12	15	W 150 X 24	30	29 x 30
6	35	35x12	15	W 150 X 29.8	30	30 x 30
7	40	40x12	15	W 150 X 37.1	30	31 x 30
8	50	50x12	20	W 200 X 35.9	30	x
9	55	55x12	20	W 200 X 46.1	30	x
10	60	60x12	20	W 200 X 59	30	x
11	65	65x12	20	W 200 X 71	30	x
12	70	70x12	20	W 200 X 86	30	x
13	75	75x12	20	W 200 X 100	30	x
14	80	80x12	25	W 250 X 89	30	x
15	90	90x12	25	W 250 X 101	30	x

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16. Comparativo entre as alturas de vigas obtidas após o dimensionamento pelo Concremaço®



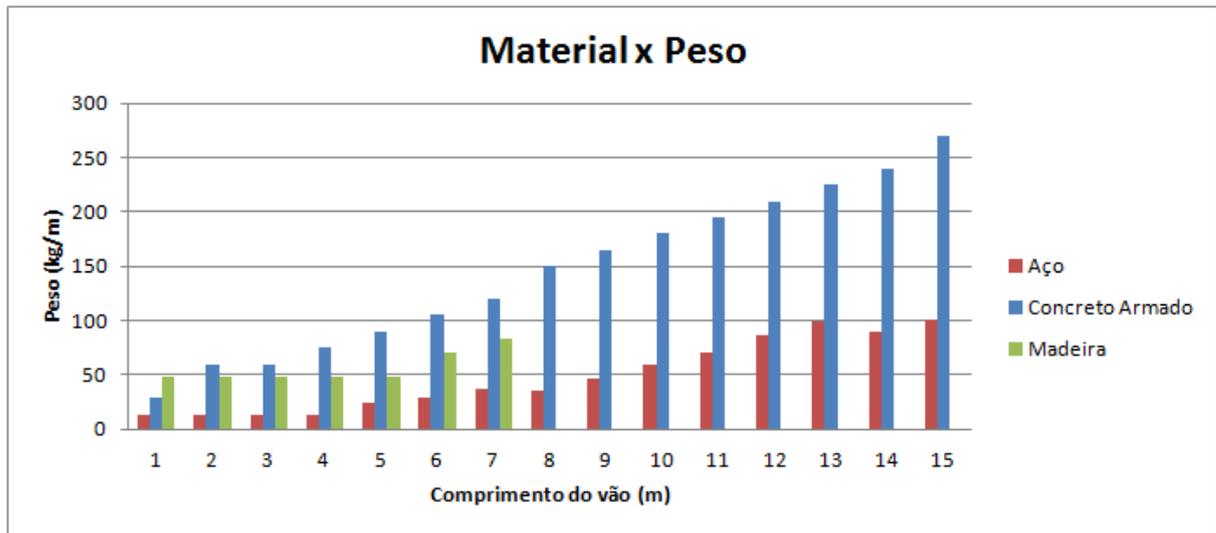
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4. Comparativo entre os pesos obtidas para os materiais estruturais após o dimensionamento pelo Concremaço®

Comprimento (m)	Peso x comprimento do vão		
	Concreto Armado	Aço	Madeira
	Peso (kg/m)	Peso (kg/m)	Peso (kg/m)
1	30	13	48,375
2	60	13	48,375
3	60	13	48,375
4	75	13	48,375
5	90	24	48,375
6	105	29,8	70,5
7	120	37,1	82,95
8	150	35,9	x
9	165	46,1	x
10	180	59	x
11	195	71	x
12	210	86	x
13	225	100	x
14	240	89	x
15	270	101	x

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17. Comparativo entre os pesos obtidos para os materiais estruturais após o dimensionamento pelo Concremaço®



Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação aos resultados encontrados, verifica-se que para pequenos vãos (de até 6 metros), não foram encontradas grandes variações no que se refere ao custo dos materiais estruturais. Acima de 7 metros, as seções disponíveis de madeira se mostraram insuficientes às solicitações adicionais (considerando as seções comerciais cadastradas no programa); nesse sentido, sugere-se a possibilidade de se trabalhar com madeira laminada.

Para vãos acima de 9 metros, constatou-se a vantagem de se trabalhar com vigas de concreto, apenas quando levamos em consideração a questão custo. Entretanto, para a execução de vigas neste material em grandes vãos são necessárias alturas que são demasiadamente superiores às do aço, conforme apresentado na Figura 16; no que se refere a este aspecto, quando consideramos a utilização de um pé-direito com dimensões usuais de 2,60, o uso de vigas de concreto não parece viável diante de grandes vãos, pois enquanto o emprego de um perfil de aço w250x101, com 25 cm de altura, parece suficiente diante da solicitação em uma extensão de 15 metros, no caso do concreto são necessários, pelo menos, 90 cm.

Além disso, quando considerados o aspecto peso, acima de 9 metros de vão, as vigas de concreto se apresentaram em torno de 64% mais pesadas que as vigas de aço; tal fato deve ser considerado principalmente quando se analisa o custo adicional das fundações.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste trabalho, diante de tudo o que foi exposto, é possível tecer mais algumas considerações, conforme apresentado a seguir:

- Estudos anteriores constataam que o emprego dos materiais estruturais concreto armado, madeira e aço apresentam vantagens e desvantagens a depender da condição da obra analisada, e que é necessária a existência de uma ferramenta que permita fazer uma análise comparativa eficiente entre os mesmos.
- O Concremaço<sup>®</sup> se mostrou como uma ferramenta viável para o dimensionamento e análise de custos, no que se refere às vigas de concreto armado, madeira e aço, considerando que os resultados por ele apresentados foram validados por meio do método analítico e da utilização de pacotes computacionais já consagrados no mercado.
- Para pequenos vãos, de até 6 metros, praticamente não houve variação para os valores encontrados, ainda que as vigas de aço tenham apresentado pequenas vantagens para os primeiros 4 metros analisados. Acima de 9 metros, foi constatada a vantagem do emprego das vigas de concreto, apenas quando levamos em consideração a questão custo, enquanto que as vigas de aço se apresentaram como mais vantajosas diante da análise da altura e do peso do elemento estrutural
- Para que seja feito um estudo mais completo, são necessárias análises mais profundas acerca da economia de tempo de execução de obras, custo de sistemas construtivos integrados, gastos com manutenção dos materiais, considerações acerca das propriedades resistentes dos materiais etc, sejam desenvolvidas, a fim de se obter um parâmetro ótimo de dimensionamento e a adoção do sistema construtivo que atende perfeitamente às exigências da obra a qual será destinado.

### 6.1 Sugestões para futuras pesquisas

Não obstante, se faz necessário ressaltar que a análise de custos até aqui apresentada trata do estudo de fatores isolados, em termos de aquisições de materiais: aço e formas para as vigas de concreto armado, perfis metálicos para as vigas de aço e espécies de madeira para as vigas de madeira. É claro que outros parâmetros precisam ser analisados, como por exemplo:

o tempo de execução de uma obra em concreto armado, que em geral é mais longo quando comparado com os outros materiais, o tratamento que deve ser dado a madeira, em termos de melhoria da durabilidade do material e conseqüente manutenção das condições de ensaio e de cálculo, os gastos com mão-de-obra especializada para o caso de se trabalhar com materiais específicos, etc. Tal análise, mais específica, não é escopo deste trabalho, ficando, como sugestão para pesquisas futuras.

Outra sugestão de pesquisas futuras se debruça na possibilidade de analisar o desempenho de madeiras laminadas, para o caso em que as peças em madeira serrada se mostrarem insuficientes para a análise desejada. A mesma questão se estende para a possibilidade de trabalhar com perfis soldados, dado que o banco de dados cadastrado no Concremaço se limita aos perfis laminados e disponibilizados nos catálogos da Gerdau.

Por fim, é sugerida a possibilidade do dimensionamento de vigas contínuas, já que a rotina de cálculo até aqui desenvolvida considerou apenas o dimensionamento de vigas biapoiadas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCELOR MITTAL. **Vergalhão de Aço**. Disponível em: <<http://www.lojaarcelormittal.com.br/construcao-civil/vergalhao-de-aco/c/1231>> . Acesso em: 12 de outubro de 2017.

ARAÚJO, J.M.; **Curso de concreto armado**. Rio Grande: Dunas, 2014. v.1, 4.ed.

ARAÚJO, J.M.; **Curso de concreto armado**. Rio Grande: Dunas, 2014. v.2, 4.ed.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: **Projeto de estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: **Ações e segurança nas estruturas: Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200: **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2012.

BELLEI, I.H.; **Edifícios Industriais em aço: projeto e cálculo**. 5.ed. São Paulo: Pini, 2006.

CARVALHO, R.C., CARVALHO, J.R.F.F., **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4.ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

CYPE. **Estudantes e utilizadores actualizados podem utilizar gratuitamente todo o software CYPE**. Disponível em: <[http://versoes.cype.pt/after\\_hours.htm](http://versoes.cype.pt/after_hours.htm)>. Acesso em: 06 de novembro de 2017.

GERADOR DE PREÇOS. Disponível em:  
<[http://www.brasil.geradordeprecos.info/obra\\_nova/Estruturas/Aco/Vigas/Aco\\_em\\_vigas\\_0\\_0\\_2\\_0.html](http://www.brasil.geradordeprecos.info/obra_nova/Estruturas/Aco/Vigas/Aco_em_vigas_0_0_2_0.html)> . Acesso em: 20 de outubro de 2017.

GERDAU. Perfis Estruturais Gerdau. Disponível em:  
<<https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/perfis-estruturais-gerdau#ad-image-0>> Acesso em: 08 de outubro de 2017.

GUANABARRA, M.K.; **Dimensionamento de estruturas metálicas: Rotina Computacional para a seleção de perfis metálicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2010.

LOPES, A.G.; **Introdução à Programação em Visual Basic 2010**. Lisboa: FCA, 2010.

MAIA, C.D.C.D.; **Dimensionamento de Estruturas Metálicas Assistido por Computador**. João Pessoa: UFPB, 2014.

MARTINS, M.M; **Dimensionamento de Estruturas de Aço em Situação de incêndio**. Minas Gerais. UFMG, 2000.

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Concreto e Construções, Mar. de 2009. Disponível em:  
<[http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/rev\\_construcao/pdf/Revista\\_Concreto\\_53.pdf](http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf)>. Acesso em: 19 de outubro de 2017.

PFEIL, W. PFEIL, J.; **Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PFEIL, W. PFEIL, J.; **Estruturas de madeira**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PINHEIRO, L.M.; **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. UFscar, São Paulo, 2010.

PINTO, E.M.; CALIL JUNIOR, C.; **Resistência Mecânica de estruturas de Madeira em Situação de Incêndio: Proposta para a inclusão em anexo da NBR 7190**. São Paulo: Ufscar, 2004.

SEINFRA-CE. **Tabela de custos**. Disponível em:  
<<http://www.lojaarcelormittal.com.br/construcao-civil/vergalhao-de-aco/c/1231>> Acesso em: 30 de setembro de 2017.

SILVA, V.P.; **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012**. São Paulo: Blucher, 2012.

SILVA JÚNIOR, J.S.; **Software para soluções em estabilização de taludes**. João Pessoa: UFPB, 2016.

SINAPI – **Índices da Construção Civil**. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>.> Acesso em: 30 de setembro de 2017

## ANEXOS

## ANEXO A\_QUADROS COM INFORMAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO

Quadro A 1. Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha a	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	
a Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulosa e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.			

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6118 (2014)

Quadro A 2. Correspondências entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal = 10 mm.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo a	30		40	50
Concreto protendido b	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55
a. No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal $\geq 45$ mm					
b. Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar o cobrimento do concreto armado.					

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6118 (2014)

Quadro A 3. Fatores de combinação no estado limite último para concreto

Ações Variáveis	$\psi_0$	$\psi_2^*$
Variações uniformes de temperatura	0,6	0,3
Pressão dinâmica do vento	0,6	0
Cargas acidentais dos edifícios quando não há predominância de pesos dos equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas (edifícios residenciais)	0,5	0,3
Cargas acidentais dos edifícios, nos casos contrários (edifícios comerciais e de escritórios).	0,7	0,4
Cargas acidentais em bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,6
* Para combinações excepcionais: quando a ação principal for sismo, pode-se adotar $\psi_2 = 0$ ; quando for fogo, adota-se $\psi_2 = 0,7$		

Fonte: ARAÚJO, 2014

Quadro A 4. Coeficientes parciais para ações permanentes e acidentais para concreto

	Ações permanentes		Ações variáveis	
	Efeitos desfavoráveis	Efeitos favoráveis	Ações variáveis em geral	Ação variável temporária (Variação de temperatura)
Carregamentos Normais	$\gamma_g = 1,4$	$\gamma_g = 1,0$	$\gamma_q = 1,4$	$\gamma_\varepsilon = 1,2$
Especiais ou de construção	$\gamma_g = 1,3$	$\gamma_g = 1,0$	$\gamma_q = 1,2$	$\gamma_\varepsilon = 1,0$
Excepcionais	$\gamma_g = 1,2$	$\gamma_g = 1,0$	$\gamma_q = 1,0$	$\gamma_\varepsilon = 0$

Fonte: Adaptado de ARAÚJO (2014)

Quadro A 5. Coeficientes parciais para efeitos de recalques de apoio e de retração para concreto

Carregamentos	Efeitos desfavoráveis	Efeitos favoráveis
Normais	$\gamma_\varepsilon = 1,2$	$\gamma_\varepsilon = 0$
Especiais ou de construção	$\gamma_\varepsilon = 1,2$	$\gamma_\varepsilon = 0$
Excepcionais	$\gamma_\varepsilon = 1,0$	$\gamma_\varepsilon = 0$

Fonte: Adaptado de ARAÚJO (2014)

Quadro A 6. Coeficientes Parciais  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$  para concreto

Carregamentos	Concreto ( $\gamma_c$ )	Aço ( $\gamma_s$ )
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,0

Fonte: ARAÚJO (2014)

Quadro A 7. Coeficiente de segurança parciais aplicados às ações no Estado limite último para perfis metálicos

Ações		Combinações		
		Normais	Especiais ou de construção	Excepcionais
Permanentes	Peso próprio estruturas metálicas	1,25	1,15	1,10
	Peso próprio estruturas pré-moldadas	1,30	1,20	1,15
	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados	1,35	1,25	1,15
	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,40	1,30	1,20
	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	1,50	1,40	1,30
	Deformações impostas por recalques de apoio, imperfeições geométricas, retração e fluência do concreto	1,20	1,20	0,00
Variáveis	Efeito de temperatura	1,20	1,00	1,00
	Ação do vento	1,40	1,20	1,00
	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes de uso e ocupações	1,50	1,30	1,00

Fonte: NBR 8800/2008

Quadro A 8. Valores de fatores de combinação e de redução para as ações variáveis para perfis metálicos

Ações		$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas	0,50	0,40	0,30
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas	0,70	0,60	0,40
	Bibliotecas, arquivoc, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas	0,80	0,70	0,40
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,60	0,30	0,00
Temperaturas	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,60	0,50	0,30
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,50	0,40	0,30
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,00	0,80	0,50
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,70	0,60	0,40

Fonte: NBR 8800/2008

Quadro A 9. Valores do coeficiente Parcial de segurança. Aplicado às resistências para perfis metálicos

Material	Combinações de ações			
	$\gamma_m$	Normais	Especiais ou excepcionais	Excepcionais
Aço estrutural, pinos e parafusos - Estados limites de escoamento e flambagem	$\gamma_{a1}$	1,10	1,10	1,00
Aço estrutural, pinos e parafusos - Estados limites de ruptura	$\gamma_{a2}$	1,35	1,35	1,15
Concreto	$\gamma_c$	1,40	1,20	1,20
Aço de armadura de concreto armado	$\gamma_s$	1,15	1,15	1,00

Fonte: NBR 8800/2008

Quadro A 10. Coeficiente de majoração das ações no estado limite de projeto para madeira

Combinações	Ações permanentes		Ações variáveis
	Grande variabilidade	Pequena variabilidade	Ações variáveis em geral, incluídas as cargas acidentais moveis
Normal	1,4	1,3	1,4
Especial ou de construção	1,3	1,2	1,2
Excepcional	1,2	1,1	1

Fonte: Adaptado NBR 7190/1997

Quadro A 11. Fatores de combinação e redução para madeira

Descrição das ações		$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Ações ambientais em estruturas correntes	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local;	0,6	0,5	0,3
	Pressão dinâmica do vento	0,5	0,2	0
Cargas acidentais em edifícios	Locais onde não há predominância de pesos de locais fixos, nem elevadas concentrações de pessoas;	0,4	0,3	0,2
	Locais onde há predominância de pesos de locais fixos, nem elevadas concentrações de pessoas;	0,7	0,6	0,2
	Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Pontes de pedestres;	0,4	0,3	0,2
	Pontes rodoviárias;	0,6	0,4	0,2
	Pontes ferroviárias	0,8	0,6	0,4

Fonte: Adaptado NBR 7190/1997

Quadro A 12. Espécies de Madeira e características estruturais

Nome comum	$\rho_{ap}$ (12%) (kg/m <sup>3</sup> )	fc (Mpa)	ft (Mpa)	ft90 (Mpa)	fv (Mpa)	Ec (Mpa)	Preço R\$/m <sup>3</sup>
(Dicotiledônea)	(kg/m <sup>3</sup> )	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	R\$/m <sup>3</sup>
Angelim araroba	688	50,5	69,2	3,1	7,1	12876	2745,45
Angelim ferro	1170	79,5	117,8	3,7	11,8	20827	1825,397
Angelim pedra	694	59,8	75,5	3,5	8,8	12912	2042,42
Angelim pedra verdadeiro	1170	76,7	104,9	4,8	11,3	16694	2042,42
Clara	803	48,1	87,9	3,2	9,8	13481	0
Cafearana	677	59,1	79,7	3	5,9	14098	0
Canafístula	871	52	84,9	6,2	11,1	14613	0
Casca grossa	801	56	120,2	4,1	8,2	16224	1905,05
Castelo	759	54,8	99,5	7,5	12,8	11105	0
Cedro amargo	504	39	58,1	3	6,1	9839	0
Cedro doce	500	31,5	71,4	3	5,6	8058	0
Champagne	1090	93,2	133,5	2,9	10,7	23002	0
Cupiúba	838	54,4	62,1	3,3	10,4	13627	0
Catiúba	1221	83,8	86,2	3,3	11,1	19426	0
E. Alba	705	47,3	69,4	4,6	9,5	13409	1019,19
E. Camaldulensis	899	48	78,1	4,6	9	13286	1019,19
E. Citriodora	999	62	123,6	3,9	10,7	18421	1019,19
E. Cloeziana	822	51,8	90,8	4	10,5	13963	1019,19
E. Dunni	690	48,9	139,2	6,9	9,8	18029	1019,19
E. Grandis	640	40,3	70,2	2,6	7	12813	1019,19
E. Maculata	931	63,5	115,6	4,1	10,6	18099	1019,19
E. Maidene	924	48,3	83,7	4,8	10,3	14431	1019,19
E. Microcorys	929	54,9	118,6	4,5	10,3	16782	1019,19
E. Paniculata	1087	72,7	147,4	4,7	12,4	19881	1019,19
E. Propinqua	952	51,6	89,1	4,7	9,7	15561	1019,19
E. Punctata	948	78,5	125,6	6	12,9	19360	1019,19
E. Saligna	731	46,8	95,5	4	8,2	14933	1019,19
E. Tereticonis	899	57,7	115,9	4,6	9,7	17198	1019,19
E. Tereticonis	899	57,7	115,9	4,6	9,7	17198	1019,19
E. Thiantha	755	53,9	100,9	2,7	9,2	14617	1019,19
E. Umbra	889	42,7	90,4	3	9,4	14577	1019,19
E. Urophylla	739	46	85,1	4,1	8,3	13166	1019,19
Garapa Roraima	892	78,4	108	6,9	11,9	18359	0
Guaiçara	825	71,4	115,6	4,2	12,5	14624	0
Guarucaia	919	62,4	70,9	5,5	15,5	17212	0
Ipê	1068	76	96,8	3,1	13,1	18011	4293,94
Jatobá	1074	93,3	157,5	3,2	15,7	23067	2914,14
Jatobá	1074	93,3	157,5	3,2	15,7	23067	2914,14
Louro Preto	684	56,5	111,9	3,3	9	14185	0
Maçaranduba	1143	82,9	138,5	5,4	14,9	22733	3152,53
Maçaranduba	1143	82,9	138,5	5,4	14,9	22733	3152,53
Maçaranduba	1143	82,9	138,5	5,4	14,9	22733	3152,53

(Continua)

Mandioqueira	856	71,4	89,1	2,7	10,6	18971	0
Mandioqueira	856	71,4	89,1	2,7	10,6	18971	0
Oiticica Amarela	756	69,9	82,5	3,9	10,6	14719	0
Quarubarana	544	37,8	58,1	2,6	5,8	9067	0
Sucupira	1106	95,2	123,4	3,4	11,8	21724	2964,646
Tatajuba	940	79,5	78,8	3,9	12,2	19583	0,000
(Conífera)							
Pinho do Paraná	580	40,9	93,1	1,6	8,8	15225	1132,32
Pinus caribea	579	35,4	64,8	3,2	7,8	8431	1135,35
Pinus bahamensis	537	32,6	52,7	2,4	6,8	7110	1135,35
Pinus hondurensis	535	42,3	50,3	2,6	7,8	9868	1135,35
Pinus elliottii	560	40,4	66	2,5	7,4	11889	1135,35
Pinus oocarpa	538	43,6	60,9	2,5	8	1004	1135,35
Pinus taeda L.	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13304	1135,35

Fonte: Adaptado NBR 7190/1980

Quadro A 13. Dimensões comerciais para peças de madeira estrutural

Dimensões (cm)			
Vigas	Padronização (PB-5)	Dimensões comerciais	
		5,0 x 15,0	5,0 x 16,0
		5,0 x 20,0	6,0 x 12,0
		7,5 x 11,5	6,0 x 15,0
		7,5 x 15,0	6,0 x 16,0
		15,0 x 15,0	10,0 x 10,0
			12,0 x 12,0
			20,0 x 20,0
			25,0 x 25,0
			25,0 x 30,0

Fonte: Adaptado Pfeil &amp; Pfeil (2003)

Quadro A 14. Fatores de redução para o aço

Temperatura do Aço $\theta_a$ (°C)	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados $k_{y,\theta}$	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços treilados $k_{y\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços laminados $k_{E,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços treilados $k_{E\theta}$
20	1,000	1,000	1,0000	1,000
100	1,000	1,000	1,0000	1,000
200	1,000	1,000	0,9000	0,870
300	1,000	1,000	0,8000	0,720
400	1,000	0,940	0,7000	0,560
500	0,780	0,670	0,6000	0,400

(Continua)

600	0,470	0,400	0,3100	0,240
700	0,230	0,120	0,1300	0,080
800	0,110	0,110	0,0900	0,060
900	0,060	0,080	0,0675	0,050
1000	0,040	0,050	0,0450	0,030
1100	0,020	0,030	0,0225	0,020
1200	0,000	0,000	0,0000	0,000

Fonte: ABNT NBR 14323/2013

Quadro A 15. Fator de redução para a resistência ao escoamento de seções sujeitas a flambagem local

Temperatura do aço °C	Fator de redução
20	1,00
100	1,00
200	0,89
300	0,78
400	0,65
500	0,53
600	0,30
700	0,13
800	0,07
900	0,05
1000	0,03
1100	0,02
1200	0,00

Fonte: ABNT NBR 14323/2013

Quadro A 16. Banco de dados da Gerdau para Perfis de Aço Laminado

Bitolas	Massa linear	d	bf	Espessuras		h	d'	Área
				tw	tf			
mmxkg/m	kg/m	Mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>
W 150 x 13,0	13,0	148,0	100,0	4,3	4,9	138,0	118,0	16,6
W 150 X 18,0	18,0	153,0	102,0	5,8	7,1	139,0	119,0	23,4
W 150 X 22,5 (H)	22,5	152,0	152,0	5,8	6,6	139,0	119,0	29,0
W 150 x 24,0	24,0	160,0	102,0	6,6	10,3	139,0	115,0	31,5
W 150 X 29,8 (H)	29,8	157,0	153,0	6,6	9,3	138,0	118,0	38,5
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162,0	154,0	8,1	11,6	139,0	119,0	47,8
W 200 X 15,0	15,0	200,0	100,0	4,3	5,2	190,0	170,0	19,4
W 200 x 19,3	19,3	203,0	102,0	5,8	6,5	190,0	170,0	25,1
W 200 x 22,5	22,5	206,0	102,0	6,2	8,0	190,0	170,0	29,0
W 200 x 26,6	26,6	207,0	133,0	5,8	8,4	190,0	170,0	34,2
W 200 x 31,3	31,3	210,0	134,0	6,4	10,2	190,0	170,0	40,3

(Continua)

W 200 X 35,9 (H)	35,9	201,0	165,0	6,2	10,2	181,0	161,0	45,7
W 200 X 41,7 (H)	41,7	205,0	166,0	7,2	11,8	181,0	157,0	53,5
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203,0	203,0	7,2	11,0	181,0	161,0	58,6
W 200 X 52,0 (H)	52,0	206,0	204,0	7,9	12,6	181,0	157,0	66,9
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204,0	207,0	11,3	11,3	181,0	161,0	68,1
W 200 X 59,0 (H)	59,0	210,0	205,0	9,1	14,2	182,0	158,0	76,0
W 200 X 71,0 (H)	71,0	216,0	206,0	10,2	17,4	181,0	161,0	910,0
W 200 X 86,0 (H)	86,0	222,0	209,0	13,0	20,6	181,0	157,0	110,9
W 200 X 100,0 (H)*	100,0	229,0	210,0	14,5	23,7	182,0	158,0	127,1
W 250 x 17,9	17,9	251,0	101,0	4,8	5,3	240,0	220,0	23,1
W 250 x 22,3	22,3	254,0	102,0	5,8	6,9	240,0	220,0	28,9
W 250 x 25,3	25,3	257,0	102,0	6,1	8,4	240,0	220,0	32,6
W 250 x 28,4	28,4	260,0	102,0	6,4	10,0	240,0	220,0	36,6
W 250 x 32,7	32,7	258,0	146,0	6,1	9,1	240,0	220,0	42,1
W 250 x 38,5	38,5	262,0	147,0	6,6	11,2	240,0	220,0	49,6
W 250 x 44,8	44,8	266,0	148,0	7,6	13,0	240,0	220,0	57,6
HP 250 x 62,0 (H)	62,0	246,0	256,0	10,5	10,7	225,0	201,0	79,6
W 250 X 73,0 (H)	73,0	253,0	254,0	8,6	14,2	225,0	201,0	92,7
W 250 X 80,0 (H)	80,0	256,0	255,0	9,4	15,6	225,0	201,0	101,9
HP 250 x 85,0 (H)	85,0	254,0	260,0	14,4	14,4	225,0	201,0	108,5
W 250 X 89,0 (H)	89,0	260,0	256,0	10,7	17,3	225,0	201,0	113,9
W 250 x 101,0 (H)	101,0	264,0	257,0	11,9	19,6	225,0	201,0	128,7
W 250 X 115,0 (H)	115,0	269,0	259,0	13,5	22,1	225,0	201,0	146,1
W 250 X 131,0 (H)*	131,0	275,0	261,0	15,4	25,1	225,0	193,0	167,8
W 250 X 149,0 (H)*	149,0	282,0	263,0	17,3	28,4	225,0	193,0	190,5
W 250 X 167,0 (H)*	167,0	289,0	265,0	19,2	31,8	225,0	193,0	214,0
W 310 x 21,0	21,0	303,0	101,0	5,1	5,7	292,0	272,0	272,0
W 310 x 23,8	23,8	305,0	101,0	5,6	6,7	292,0	272,0	30,7
W 310 x 28,3	28,3	309,0	102,0	6,0	8,9	291,0	271,0	36,5
W 310 x 32,7	32,7	313,0	102,0	6,6	10,8	291,0	271,0	42,1
W 310 x 38,7	38,7	310,0	165,0	5,8	9,7	291,0	271,0	49,7
W 310x 44,5	44,5	313,0	166,0	6,6	11,2	291,0	271,0	57,2
W 310 x 52,0	52,0	317,0	167,0	7,6	13,2	291,0	271,0	67,0
HP 310x 79,0 (H)	79,0	299,0	306,0	11,0	11,0	277,0	245,0	100,0
HP 310x 93,0 (H)	93,0	303,0	308,0	13,1	13,1	277,0	245,0	119,2
W 310 X 97,0 (H)	97,0	308,0	305,0	9,9	15,4	277,0	245,0	123,6
W 310 X 107,0 (H)	107,0	311,0	306,0	10,9	17,0	277,0	245,0	136,4
H P 310x110,0 (H)	110,0	308,0	310,0	15,4	15,5	277,0	245,0	141,0
W 310 X 117,0 (H)	117,0	314,0	307,0	11,9	18,7	277,0	245,0	149,9
H P 310x125,0 (H)	125,0	312,0	312,0	17,4	17,4	277,0	245,0	159,0
W 310 X 129,0 (H)*	129,0	318,0	308,0	13,1	20,6	277,0	245,0	165,4
H P 310 x 132 (H)	132,0	314,0	313,0	18,3	18,3	277,0	245,0	167,5
W 310 X 143,0 (H)*	143,0	323,0	309,0	14,0	22,9	277,0	245,0	182,5
W 310 X 158,0 (H)*	158,0	327,0	310,0	15,5	25,1	277,0	245,0	200,7

(Continua)

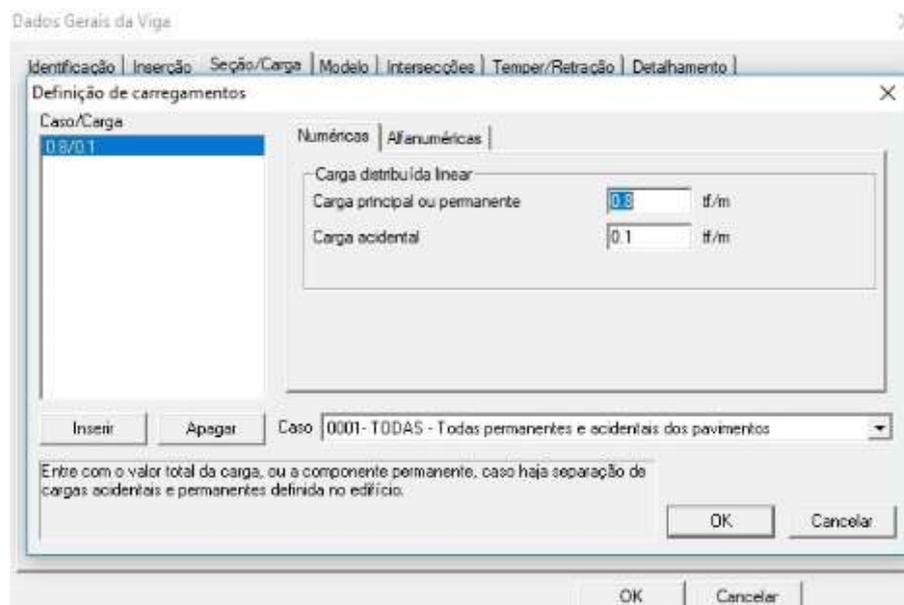
W 310 x 179,0 (H)*	179,0	333,0	313,0	18,0	28,1	277,0	245,0	227,9
W 310 X 202,0 (H)*	202,0	341,0	315,0	20,1	31,8	277,0	245,0	258,3
W 360 x 32,9	32,9	349,0	127,0	5,8	8,5	332,0	308,0	42,1
W 360 x 39,0	39,0	353,0	128,0	6,5	10,7	332,0	308,0	50,2
W 360 x 44,6	44,6	352,0	171,0	6,9	9,8	332,0	308,0	57,7
W 360 x 51,0	51,0	355,0	171,0	7,2	11,6	332,0	308,0	64,8
W 360 x 58	58,0	358,0	172,0	7,9	13,1	332,0	308,0	72,5
W 360 x 64,0	64,0	347,0	203,0	7,7	13,5	320,0	288,0	81,7
W 360 x 72,0	72,0	350,0	204,0	8,6	15,1	320,0	288,0	91,3
W 360 x 79,0	79,0	354,0	205,0	9,4	16,8	320,0	288,0	101,2
W 360 X 91,0 (H)	91,0	353,0	254,0	9,5	16,4	320,0	288,0	115,9
W 360 X 101,0 (H)	101,0	357,0	255,0	10,5	18,3	320,0	286,0	129,5
W 360 X 110,0 (H)	110,0	360,0	256,0	11,4	19,9	320,0	288,0	140,6
W 360 X 122,0 (H)	122,0	363,0	257,0	13,0	21,7	320,0	288,0	155,3
W 410 x 38,8	38,8	399,0	140,0	6,4	8,8	381,0	357,0	50,3
W 410 x 46,1	46,1	403,0	140,0	7,0	11,2	381,0	357,0	59,2
W 410 x 53,0	53,0	403,0	177,0	7,5	10,9	381,0	357,0	68,4
W 410 x 60,0	60,0	407,0	178,0	7,7	12,8	381,0	357,0	762,0
W 410 x 67,0	67,0	410,0	179,0	8,8	14,4	381,0	357,0	86,3
W 410 x 75,0	75,0	413,0	180,0	9,7	16,0	381,0	357,0	95,8
W 410 x 85,0	85,0	417,0	181,0	10,9	18,2	381,0	357,0	1086,0
W 460 x 52,0	52,0	450,0	152,0	7,6	10,8	428,0	404,0	66,6
W 460 x 60,0	60,0	455,0	153,0	8,0	13,3	428,0	404,0	76,2
W 460 x 68,0	68,0	459,0	154,0	9,1	15,4	428,0	404,0	87,6
W 460 x 74,0	74,0	457,0	190,0	9,0	14,5	428,0	404,0	94,9
W 460 x 82,0	82,0	460,0	191,0	9,9	16,0	428,0	404,0	104,7
W 460 x 89,0	89,0	463,0	192,0	10,5	17,7	428,0	404,0	114,1
W 460 x 97,0	97,0	466,0	193,0	11,4	19,0	428,0	404,0	123,4
W 460 x 106,0	106,0	469,0	194,0	12,6	20,6	428,0	404,0	135,1
W 530 x 66,0	66,0	525,0	165,0	8,9	11,4	502,0	478,0	83,6
W 530 x 72,0	72,0	524,0	207,0	9,0	10,9	502,0	478,0	91,6
W 530 x 74,0	74,0	529,0	166,0	9,7	13,6	502,0	478,0	95,1
W 530 x 82,0	82,0	528,0	209,0	9,5	13,3	501,0	477,0	104,5
W 530 x 85,0	85,0	535,0	166,0	10,3	16,5	502,0	478,0	107,7
W 530 x 92,0	92,0	533,0	209,0	10,2	15,6	502,0	478,0	117,6
W 530 X 101,0	101,0	537,0	210,0	10,9	17,4	502,0	470,0	130,0
W 530 X 109,0	109,0	539,0	211,0	11,6	18,8	501,0	469,0	139,7
W 530x 123,0•	1230,0	544,0	212,0	13,1	21 ,2	502,0	470,0	157,8
w 530" 138,0*	138,0	549,0	214,0	14,7	23,8	501,0	469,0	177,8
W 610 x 82,0	82,0	599,0	178,0	10,0	12,8	573,0	541,0	105,1
W 610 x 92,0	92,0	603,0	179,0	10,9	15,0	573,0	541,0	118,4
W 610x 101,0	101,0	603,0	228,0	10,5	14,9	573,0	541,0	130,3
W 610 x 113,0	113,0	608,0	228,0	11,2	17,3	573,0	541,0	1453,0
W 610x 125,0	125,0	612,0	229,0	11,9	19,6	573,0	541,0	160,1

(Continua)

W 610x 140,0	140,0	617,0	230,0	13,1	22,2	573,0	541,0	179,3
W 610x 153,0*	153,0	623,0	229,0	14,0	24,9	573,0	541,0	196,5
W 610x 155,0	155,0	611,0	324,0	12,7	19,0	573,0	541,0	198,1
W 610 X 174,0	174,0	616,0	325,0	14,0	21,6	573,0	541,0	222,8
W 610 X 195,0	195,0	622,0	327,0	15,4	24,4	573,0	541,0	250,1
W 610 x 217,0	217,0	628,0	328,0	16,5	27,7	573,0	541,0	278,4

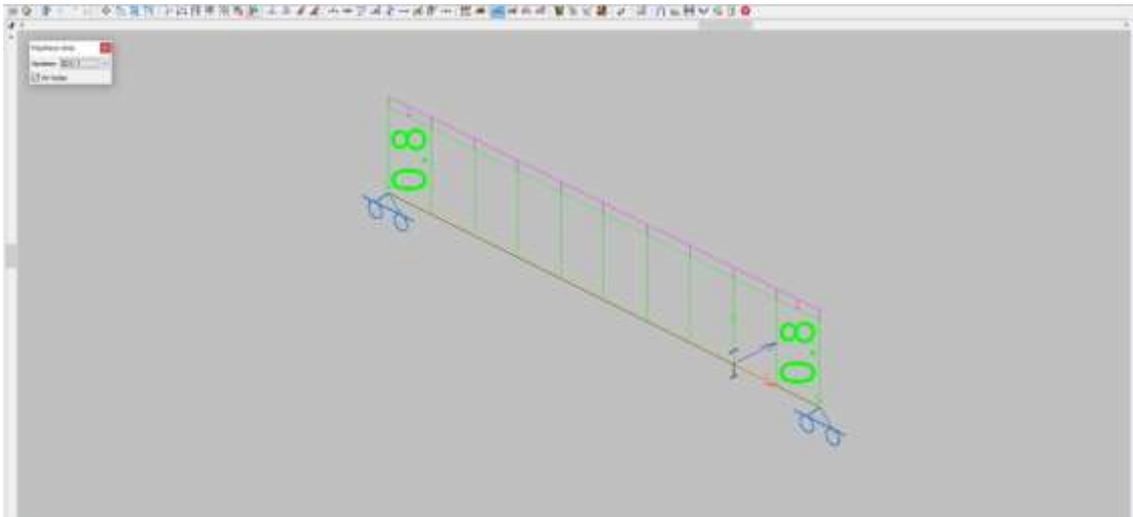
Fonte: Catálogo Gerdau

## ANEXO B – VERIFICAÇÃO PARA VIGAS DE CONCRETO USANDO O TQS





## ANEXO C – VERIFICAÇÃO PARA VIGAS DE AÇO ATRAVÉS DO CYPE 3D



Perfil	Peso	Resistência
✘ W 150 x 13	13.03	192.70 %
✘ W 150 x 18	18.37	133.26 %
✔ W 150 x 24.0	24.73	94.01 %
✘ W 200 x 15	15.23	125.60 %
✔ W 200 x 19.3	19.70	97.46 %
✔ W 200 x 22.5	22.77	82.38 %
✔ W 200 x 26.6	26.85	65.80 %
✔ W 200 x 31.3	31.64	54.86 %
✔ W 250 x 17.9	18.13	88.04 %
✔ W 250 x 22.3	22.69	69.39 %
✔ W 250 x 25.3	25.59	59.71 %
✔ W 250 x 28.4	28.73	51.99 %
✔ W 250 x 32.7	33.05	43.35 %
✔ W 250 x 38.5	38.94	35.88 %
✔ W 250 x 44.8	45.22	30.64 %
✔ W 310 x 21	21.35	63.64 %
✔ W 310 x 23.8	24.10	55.75 %

Não foram definidos limites de flecha

Significado dos ícones

- ✘ Perfil que não cumpre alguma verificação.
- ✔ Perfil que cumpre todas as verificações.

Aceitar Cancelar

## RELATÓRIO DO CYPE 3D

### Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\sigma : \underline{0.940} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 2.500 m do nó N1, para a combinação de ações 1.5·PP+1.5·CP1+1.5·SCU1.

$$M_{sd}^+ : \text{Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.} \quad M_{sd}^+ : \underline{4.304} \quad \text{t}\cdot\text{m}$$

Já que ' $\sigma < \sigma_r$ ', deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G).  $21.12 < 161.22$

Onde:

$$\sigma : \underline{21.12}$$

Sendo:

$$h : \text{Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.} \quad h : \underline{139.40} \quad \text{mm}$$

$$t_w : \text{Espessura da alma.} \quad t_w : \underline{6.60} \quad \text{mm}$$

$$\sigma_r : \underline{161.22}$$

Sendo:

$$E : \text{Módulo de elasticidade do aço.} \quad E : \underline{2038736} \quad \text{kgf/cm}^2$$

$$f_y : \text{Resistência ao escoamento do aço.} \quad f_y : \underline{2548.42} \quad \text{kgf/cm}^2$$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  de vigas de alma não-esbelta deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

$$M_{Rd} : \underline{4.578} \quad \text{t}\cdot\text{m}$$

- (a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} : \underline{6.012} \quad \text{t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$W_x : \text{Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.} \quad W_x : \underline{173.00} \quad \text{cm}^3$$

$$f_y : \text{Resistência ao escoamento do aço.} \quad f_y : \underline{2548.42} \quad \text{kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{a1} : \text{Coeficiente de segurança do material.} \quad \sigma_{a1} : \underline{1.10}$$

- (b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

Não é necessário, pois o comprimento de flambagem lateral é nulo.

- (c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$4.95 < 10.75$$

$$M_{Rd} : \underline{4.578} \quad \text{t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$\square : \underline{4.95}$$

Sendo:

$b_f$ : Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{102.00} \text{ mm}$$

$t_f$ : Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{10.30} \text{ mm}$$

$$\square_p : \underline{10.75}$$

Sendo:

$E$ : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$f_y$ : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{pl} : \underline{5.036} \text{ t}$$

Onde:

$Z_x$ : Módulo de resistência plástica.

$$Z_x : \underline{197.60} \text{ cm}^3$$

$f_y$ : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

$\square_{a1}$ : Coeficiente de segurança do material.

$$\square_{a1} : \underline{1.10}$$

(d) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$21.12 \square \underline{106.35}$$

$$M_{Rd} : \underline{4.578} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$\square : \underline{21.12}$$

Sendo:

$h$ : Altura da alma, tomada igual à distância entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{139.40} \text{ mm}$$

$t_w$ : Espessura da alma.

$$t_w : \underline{6.60} \text{ mm}$$

$$\square_p : \underline{106.35}$$

Sendo:

$E$ : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$f_y$ : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{pl} : \underline{5.036} \text{ t}$$

Onde:

$Z_x$ : Módulo de resistência plástica.

$$Z_x : \underline{197.60} \text{ cm}^3$$

$f_y$ : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

$\square_{a1}$ : Coeficiente de segurança do material.

$$\square_{a1} : \underline{1.10}$$

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – PRECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO

Precificação Concreto	
Fck	Custo Sinapi/ Seinfra/ Orse (R\$/kg)
20	251,07
25	259,88
30	268,44
35	286,77
40	305,1
45	379,77
50	454,41
55	546,68
60	546,68
65	546,68
70	546,68
75	546,68
80	546,68
85	546,68
90	546,68

Fonte: Adaptado do Sinapi e Seinfra

Precificação Aço para Concreto Armado	
Bitola	Custo Sinapi/Seinfra (R\$/kg)
5.0	9,78
6.3	9,14
8.0	9,02
10.0	7,38
12.5	6,27
16.0	5,11
20.0	4,67
25.0	5,12

Fonte: Adaptado do Sinapi e Seinfra

Precificação Formas	
Especificação	R\$/m <sup>2</sup>
Forma em chapa de madeira compensada plastificada, e=18mm	78,22

Fonte: Adaptado do Sinapi

## APÊNDICE B – RELATÓRIO DE CÁLCULO EMITIDO PELO CONCREMAÇO® PARA VIGAS DE CONCRETO

The screenshot shows the 'Concremaço' software interface. The window title is 'Concremaço'. The menu bar includes 'Arquivo' and 'Calcular'. The main menu has 'Inicial', 'Cargas', 'Concreto Armado', 'Aço', 'Madeira', 'Resultados', 'Detalhamento', and 'Relatórios'. The 'Concreto Armado' sub-menu is active, with 'Aço' and 'Madeira' options. The main content area is divided into three columns:

- Dimensionamento à flexão:**
  - Fd = 14.28 kN/m
  - Md = 44.63 kN.m
  - Fck = 25 Mpa
  - Fyk = 500 Mpa
  - αc = 0.85
  - d = 36.00 cm
  - x/d = 0.45
  - xlim = 0.16 cm
  - Mdlim = 69.68 kN.m
  - μ = 0.19
  - ξ = 0.26
  - As = 3.19 cm²
  - A's = 0.00 cm²
  - Fcd = 17.86 Mpa
  - Fyd = 434.78 Mpa
  - σcd = 15.18 Mpa
  - μlim = 0.30
- Dimensionamento ao cortante:**
  - Vsd = 35.70 kN
  - Vrd2 = 187.46 kN
  - αv2 = 0.90
  - Fctm = 2.56 Mpa
  - Vc = 33.24 kN
  - Vsw = 2.46 kN
  - Asw/s = 1.42 cm²/m
  - Fctd = 1.28 Mpa
- Considerações incêndio:**
  - fd = 11.04 kN/m
  - fck = 25 Mpa

## APÊNDICE C – ROTEIRO DE CÁLCULO PARA VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DE VIGAS DE CONCRETO ATRAVÉS DO MÉTODO ANALÍTICO

### C.1 Cálculo dos esforços solicitantes

$$F_d = \gamma_g \cdot F_{gk} + \gamma_q \cdot (F_{q1k} + \psi_{oj} \cdot F_{qjk}) = 1,4x(8 + 0,12x0,4x25) + 1,4x(1) = 14,28 \text{ kN/m}$$

$$M_d = \frac{qxl^2}{8} = \frac{14,28x5^2}{8} = 44,63 \text{ kN.m}$$

### C.2 Cálculo dos esforços resistentes

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1,4} = 17,86 \text{ Mpa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ Mpa}$$

$$\alpha_c = 0,85, f_{ck} \leq 50 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{cd} = \alpha_c f_{cd} = 0,85 \times 17,86 = 15,18 \text{ Mpa}$$

### C.3 Cálculo das variáveis de cálculo e dimensionamento ao momento fletor

$$x/d = 0,45, f_{ck} < 50 \text{ Mpa}$$

$$d = h - \phi_l - c - \phi_t = 40 - \frac{1}{2} - 0,5 - 3 = 36 \text{ cm}$$

$$x_{lim} = 36 \times 0,45 = 16,2 \text{ cm}$$

$$M_{d,lim} = (d - 0,5 \cdot \lambda x_{lim}) \cdot (\lambda x_{lim} \cdot b \cdot \sigma_{cd}) = (0,36 - 0,5 \times 0,8 \times 0,16) \times (0,8 \times 0,16 \times 0,12 \times 15,18 \times 10^3) = 69,98 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{lim} = \frac{M_{d,lim}}{bd^2 \sigma_{cd}} = \frac{69,98}{0,12 \times 0,36^2 \times 15,18 \times 10^3} = 0,295$$

$$\mu = \frac{M_{d,lim}}{bd^2 \sigma_{cd}} = \frac{44,63}{0,12 \times 0,36^2 \times 15,18 \times 10^3} = 0,189 \rightarrow \mu_{lim} > \mu \rightarrow \text{As simples}$$

$$\xi = \frac{1 - \sqrt{1 - 2\mu}}{\lambda} = \frac{1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,189}}{0,8} = 0,264$$

$$A_s = \lambda \cdot \xi \cdot b \cdot d \cdot \sigma_{cd} / f_{yd} = 0,8 \times 0,264 \times 0,12 \times 0,40 \times \frac{15,18}{434,78} = 3,19 \text{ cm}^2$$

$$A'_s = 0$$

$$A_{s, \min} = \frac{0,15}{100} \times 12 \times 40 = 0,72 \text{ cm}^2$$

#### C.4 Dimensionamento ao esforço cortante

$$V_{sd} = \frac{qxl}{2} = \frac{14,28 \times 5}{2} = 35,7$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot bw \cdot d = \frac{0,27 \times 0,9 \times 25}{1,4} \times 10^3 \times 0,12 \times 0,40 = 187,46 \text{ kN}$$

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = \left(1 - \frac{25}{250}\right) = 0,9$$

$$f_{ctm} = 0,3 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 \times 25^{\frac{2}{3}} = 2,56 \text{ Mpa}$$

$$f_{ctd} = \frac{0,7 f_{ctm}}{\gamma_c} = \frac{0,7 \times 2,56}{1,4} = 1,28 \text{ Mpa}$$

$$V_c = 0,6 f_{ctd} b w d = 0,6 \times \frac{1,28}{10} \times 12 \times 36 = 33,24 \text{ kN}$$

$$V_{sw} = Vsd_{Rd3} - V_c = 35,7 - 33,24 = 2,46 \text{ kN}$$

$$\frac{As_w}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9df_{ywd}(sen\alpha + cos\alpha)} = \frac{2,46}{0,9 \times 0,36 \times 43,48} = 0,17 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\frac{As_w}{s}, \text{min} = 1,42 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

## APÊNDICE D – RELATÓRIO DE CÁLCULO EMITIDO PELO CONCREMAÇO® PARA VIGAS DE AÇO

Concremaço

Arquivo    Calcular

Inicial    Cargas    Concreto Armado    Aço    Madeira    Resultados    Detalhamento    Relatórios

Concreto armado    Aço    Madeira

Esforços solicitantes e características das seções		Esforços resistentes		Considerações incêndio	
Perfil Escolhido =	W 150 x 24.0	Mpl =	6532.17 kN.cm	fd =	9.06 kN/m
bf =	102 mm	Mr =	4003.44 kN.cm	Mf,rd =	7511.9 kN.cm
tf =	10.3 mm	MRd_elastica =	7798.90 kN.cm		
to =	6.6 mm	<b>FLM</b>			
h =	139 mm	λ =	4.95		
d =	160 mm	λp =	9.15		
		λr =	23.89		
W =	165.77 cm³	Mrd_FLM =	5938.3		
Z =	189.34 cm³	<b>FLA</b>			
E =	200 Gpa	λ =	21.06		
fy =	345 Mpa	λp =	90.53		
Fd =	13.86 kN/m	λr =	137.24		
Md =	4331.2 kN.cm	Mrd_FLA =	5938.3		

## APÊNDICE E – ROTEIRO DE CÁLCULO PARA VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DE VIGAS DE AÇO ATRAVÉS DO MÉTODO ANALÍTICO

Estado limite FLT: As vigas foram consideradas travadas lateralmente. Assim como o Cype3D, a verificação foi feita apenas para o estado limite FLA e FLM.

Perfil Escolhido: W150x24

Informações do perfil:

$$b_f(\text{largura da mesa}) = 102.0 \text{ mm}$$

$$t_f(\text{espessura da mesa}) = 10.3 \text{ mm}$$

$$t_o(\text{espessura da alma}) = 6.6 \text{ mm}$$

$$h(\text{altura de eixo a eixo de mesa}) = 139.0 \text{ mm}$$

$$d(\text{altura do perfil}) = 160.0 \text{ mm}$$

$$\text{massa linear} = 24.0 \text{ kg/m}$$

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

$$F_y = 345 \text{ Mpa (ASTM 572 G50)}$$

### E.1 Cálculo dos esforços solicitantes

$$F_d = \gamma_g \cdot F_{gk} + \gamma_q \cdot (F_{q1k} + \psi_{oj} \cdot F_{qjk}) = 1,5x(8 + 24/100) + 1,5x(1) = 13,86 \text{ kN/m}$$

$$M_d = \frac{qx l^2}{8} = \frac{13,86x5^2}{8} = 43,31 \text{ kN.m}$$

### E.2 Cálculo dos momentos resistentes

$$M_{pl} = Z f_y = 189,15 x \frac{345}{10} = 65,26 \text{ kN.cm}$$

$$M_r = (f_y - 0,3f_y)W = \frac{(345 - 0,3 \times 345)}{10} \times 165,61 = 3999,56 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rd} = \frac{1,5 \times W \times f_y}{\gamma_{a1}} = 1,5 \times 165,61 \times \frac{345}{1,1} = 7791,38 \text{ kN.cm}$$

**Estados limites FLM e FLA:**

FLM:

$$\lambda = \frac{bf/2}{tf} = \frac{102}{10,3} = 4,95$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{345}} = 9,15$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{0,7f_y}} = 0,83 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{0,7 \times 345}} = 36,49$$

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{6526}{1,1} = 5932,57 \text{ kN.cm}$$

Para FLA:

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{139}{6,6} = 21,06$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{210 \times 10^3}{345}} = 90,53$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 5,70 \sqrt{\frac{210 \times 10^3}{345}} = 137,24$$

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{6526}{1,1} = 5932,57 \text{ kN.cm}$$

Logo,  $M_d < M_{Rd} \rightarrow$  **W150x24 OK!**

## APÊNDICE F – RELATÓRIO DE CÁLCULO EMITIDO PELO CONCREMAÇO® PARA VIGAS DE MADEIRA

Concremaço

Arquivo Calcular

Inicial Cargas Concreto Armado Aço Madeira Resultados Detalhamento Relatórios

Concreto armado Aço Madeira

Esforços solicitantes e características das seções	Esforços resistentes	Considerações incêndio
Seção Escolhida = <b>Pinus taeda L. (25x30)</b>	fcd = <b>1.07</b> Mpa	fd = <b>9.20</b> kN/m
Espécie = <b>Conífera</b>	ftd = <b>1.55</b> Mpa	fcd,in = <b>2.54</b> Mpa
ρap = <b>645</b> kg/m³	fvd = <b>0.11</b> Mpa	ftd,in = <b>3.68</b> Mpa
fco = <b>44.4</b> Mpa		fvd,in = <b>0.34</b> Mpa
fto = <b>82.8</b> Mpa		
fv = <b>7.7</b> Mpa		
Fd = <b>11.80</b> kN/m		
Md = <b>3687.5</b> kN.cm		
Vd = <b>29.50</b> kN		
σtd = <b>0.98</b> Mpa		
σcd = <b>0.98</b> Mpa		
σvd = <b>0.06</b> Mpa		

## APÊNDICE G – ROTEIRO DE CÁLCULO PARA VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DE VIGAS DE MADEIRA ATRAVÉS DO MÉTODO ANALÍTICO

Seção/espécie selecionada:

Pinus Taeda (25x30)

Características da espécie:

Espécie: Conífera

$$\rho_{ap} = 645 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{co} = 44,4 \text{ Mpa}$$

$$f_{to} = 82,8 \text{ Mpa}$$

$$f_v = 7,7 \text{ Mpa}$$

$\sigma$

### G1. Cálculo dos esforços solicitantes

$$F_d = \gamma_g \cdot F_{gk} + \gamma_q \cdot (F_{q1k} + \psi_{oj} \cdot F_{qjk}) = 1,3x(8 + 645x0,25x0,3/100) + 1,4x(1) = 11,87 \text{ kN/m}$$

$$M_d = \frac{qxl^2}{8} = \frac{11,87x5^2}{8} = 37,10 \text{ kN.m}$$

$$V_d = \frac{qxl}{2} = \frac{11,87x5}{2} = 29,68 \text{ kN}$$

$$\sigma_{td} = \frac{M_d}{W_t} = \frac{6M_d}{bh^2} = \frac{6x37,10x100}{25x30^2} = 0,98 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{cd} = \frac{M_d}{W_t} = \frac{6M_d}{bh^2} = \frac{6x37,10x100}{25x30^2} = 0,98 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_d = \frac{3V}{2bh} = \frac{3x29,68}{25x30} = 0,059 \text{ kN/cm}^2$$

## G2. Cálculo dos esforços resistentes

Classe de carregamento: Permanente;

Classe de umidade: Classe 1;

Categoria estrutural: 1ª categoria;

$$k_{mod1} = 0,6$$

$$k_{mod2} = 1$$

$$k_{mod3} = 0,8$$

$$k_{mod} = k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3} = 0,6 \times 0,8 \times 1 = 0,48$$

$$f_{cd} = k_{mod} \frac{f_{co}}{\gamma_w} = \frac{0,48 \times 44,4 \times 0,7}{1,4} = 10,66 \text{ Mpa} = 1,07 \text{ kN/cm}^2 > \sigma_{cd} \rightarrow Ok!$$

$$f_{td} = k_{mod} \frac{f_{to}}{\gamma_w} = \frac{0,48 \times 82,8 \times 0,7}{1,8} = 15,46 \text{ Mpa} = 1,55 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} > \sigma_{td} \rightarrow Ok!$$

$$f_{vd} = k_{mod} \frac{f_{to}}{\gamma_w} = \frac{0,48 \times 7,7 \times 0,54}{1,8} = 1,11 \text{ Mpa} = 0,111 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} > \sigma_{vd} \rightarrow Ok!$$