UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

Curso de Graduação em Engenharia Civil

ALEX S. COPETTI LIMA

SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Ijuí/RS

2012

Alex S. Copetti Lima

SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijuí, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Profª. Cristina Eliza Pozzobon, M. Eng.

Ijuí/RS

2012

ALEX S. COPETTI LIMA

SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora

Banca examinadora

_____

Prof. Cristina Eliza Pozzobon, M. - Orientadora

_____

Prof. Raquel Kohler, M. Arq.

Ijuí, 28 de novembro de 2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela vida e todas as bênçãos que concedeu.

Agradeço a minha querida família pelo apoio incondicional e paciência nos momentos difíceis durante esta caminhada.

Agradeço ao irmão e amigo Eng. Diomar Copetti Lima pela orientação e conhecimentos oferecidos.

Agradeço a todos os professores do Curso de engenharia Civil da Unijuí, em especial à Professora Cristina E. Pozzobon, pela orientação e conhecimentos transferidos.

Agradeço ainda a todos os amigos e colegas do curso, pelos bons momentos vivenciados durante a graduação.

RESUMO

A construção em aço é uma atividade emergente no Brasil, registrada por estatísticas que indicam um constante crescimento neste segmento tanto em obras industriais, agrícolas, residenciais e demais empreendimentos. Associada ao aumento da diversificação de utilização de tais estruturas vem a necessidade de verificação da segurança ao fogo, haja vista que, estas têm um comportamento diferente daquele à temperatura ambiente e, embora as probabilidades de ocorrência de incêndios sejam pequenas trazem em geral conseqüências catastróficas. Constituindo por objetivo a preservação da vida humana em um incêndio, a segurança das estruturas expostas ao fogo deve ser garantida, para evitar o colapso da estrutura em tempo inferior àquele necessário à fuga dos usuários e/ou aproximação e ingresso de pessoas e equipamentos para combate ao fogo, obtendo como segundo plano a minimização de prejuízos materiais, como a perda de mercadorias, documentos e ruína da própria estrutura. Torna-se imprescindível que se atente para normas técnicas e as legislações vigentes sobre o tema. Atualmente como alternativas de proteção passiva ao fogo, pode-se envolver os perfis metálicos em material de proteção térmica ou ainda dimensionar a estrutura para resistir à temperatura elevada, inclusive com auxílio de softwares específicos, porém a escolha do material apropriado deve ser realizada com critério e ser específica para cada situação. Nesse contexto, este trabalho objetivou verificar o comportamento das estruturas de aço em situação de incêndio, com vistas à redução de suas propriedades físicas em função da elevação de temperatura e compará-los com os limites de resistência exigidos para manutenção da segurança. Adotou-se como modelo, para determinar os limites de resistência ao fogo das estruturas de aço, um pavilhão industrial, e para este, determinou-se os meios de proteção passiva e analisou-se os custos para diferentes soluções. Para tanto definiu-se o modelo de pórtico principal, determinou-se o tempo necessário de resistência ao fogo dos elementos estruturais, verificaram-se as alternativas de proteção ao fogo, traçou-se um comparativo entre os métodos de proteção e verificou-se os resultados. Com isso concluiu-se que as alternativas

de aplicação de pintura intumescente e a de utilização de placas de gesso acartonado se situam num similar patamar de custos e que a argamassa projetada e a manta cerâmica situam-se em outro inferior e, também, possuem valores similares. Alem disso evidenciou-se que torna-se importante analisar, além dos custos, outros fatores como acabamento, necessidade de resistência a impactos, exposição a intempéries, os quais devem ser levados em conta para a correta escolha do material de proteção passiva das estruturas de aço.

Palavras-chave: Estruturas de aço, incêndio, proteção passiva.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Perfis formados a frio 14
Figura 2- Perfis laminados padrão americano 14
Figura 3- Perfis laminados de abas planas 14
Figura 4- Perfis soldados, VS, CVS e CS 15
Figura 5- Ensaio de tração 16
Figura 6- Ensaio de tração (Aços ASTM A36 e ASTM A572) 16
Figura 7- Tetraedro do fogo 29
Figura 8- Curva temperatura x tempo de um incêndio real 31
Figura 9- Redução da resistência ao escoamento do aço frente a temperatura 33
Figura 10- Redução do módulo de elasticidade em função da temperatura 33
Figura 11- Modelo de incêndio padrão 36
Figura 12- Temperatura do elemento de aço, tendo por base o modelo do incêndio padrão. .. 39
Figura 13- Argamassa projetada 44
Figura 14- Fibra projetada 44
Figura 15- Placas de lã de rocha 45
Figura 16- Manta cerâmica 45
Figura 17- Pintura intumescente 46
Figura 18- Proteção por meio de alvenaria 46
Figura 19- Proteção com forro de gesso acartonado 47
Figura 20- Proteção por meio de placas 47
Figura 21- Proteção com concreto 48
Figura 22- Fluxograma das atividades 50
Figura 23- Galpão industrial com pórticos de perfis em alma cheia 51
Figura 24- Elevação transversal 52
Figura 25- Planta de eixos dos pilares 52
Figura 26- Interface gráfica do software mCalc3D 53
Figura 27- Lançamento de cargas no mCalc3D 53
Figura 28- Interface gráfica ST_VENTO 54
Figura 29- Diagrama de esforço normal (ELU), comb. 2 54
Figura 30- Diagrama de esforço normal (ELU), comb. 1 54
Figura 31- Diagrama de esforço cortante (ELU), comb. 1 55
Figura 32- Diagrama de esforço cortante (ELU). comb. 2 55
Figura 33- Diagrama de momentos (ELU), comb. 2 55
Figura 34- Diagrama de momentos (ELU), ... 55
Figura 35- Deslocamentos máximos (ELS), Comb. 3 55
Figura 36- Geometria deformada (ELS), Comb. 3 55
Figura 37- Solicitações (ELU), Comb. 1 56

Figura 38- Solicitações (ELU), Comb. 2 56
Figura 39- Reações nos apoios 56
Figura 40- Perfil "i" laminado de abas paralelas 57
Figura 41- Fluxograma de dimensionamento da estrutura de aço em situação de incêndios pelo método simplificado 58
Figura 42- Ilustração da tabela A.1 NBR-14432:2001 60
Figura 43- Fator de massividade para alguns elementos estruturais sem proteção 61
Figura 44- Variação de Fup em função da temperatura crítica 63
Figura 45- Carta de cobertura pintura Intumescente 66
Figura 46- Carta de cobertura para placas de gesso acartonado 67
Figura 47- Carta de cobertura da Argamassa projetada 68
Figura 48- Carta de cobertura da manta cerâmica. 69
Figura 49- Fatores de redução para o aço 70
Figura 50- Variação dos fatores de redução para o limite de escoamento e o módulo de elasticidade do aço com a temperatura 70
Figura 51- Valores da ação permanente (KN/cm) 72
Figura 52- Ação variável (KN/cm) 72
Figura 53- Gráfico comparativo de custos (R$) para diferentes alternativas de proteção passiva em estruturas de aço 73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Valores de $(b/t)lim$ 22
Quadro 2- Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados 24
Quadro 3- Comparação estatística das mortes entre diferentes causas de acidentes 31
Quadro 4- Fatores de redução para o aço 40
Quadro 5- Dimensões e propriedades geométricas dos perfis escolhidos 57
Quadro 6- Isenções segundo a NBR-14432:99 59
Quadro 7 - Temperatura do aço exposto ao incêndio padrão 62
Quadro 8- Custo para proteção com pintura intumescente 67
Quadro 9- Custo para proteção com gesso acartonado 67
Quadro 10- Custo para proteção com Argamassa projetada. 68
Quadro 11- Custo para proteção com manta cerâmica 69
Quadro 12 Comparativo entre diferentes sistemas de proteção passiva em estruturas de aço . 74
Quadro 13- Análise de consumo e custos para diferentes alternativas de proteção passiva 75

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A.C. – Antes de Cristo

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CBCA – Centro Brasileiro de Construção em Aço

CS – Coluna soldada

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional

CVS – Coluna viga soldada

ELU – Estados limites últimos

ELS – Estados limites de serviço

IAB – Instituto Aço Brasil

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação

O_2 – Oxigênio

TRRF – Tempo requerido de resistência ao fogo

VS – Viga soldada

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO **11**

1 REVISÃO DA LITERATURA **12**

1.1 HISTÓRICO DO AÇO 12
1.2 VANTAGENS DAS ESTRUTURAS METÁLICAS 13
1.3 O AÇO E SUAS PROPRIEDADES 13
1.4 CRITÉRIOS DE PROJETO 15
1.4.1 Verificação para estado limite último (ELU) **16**
1.4.2 Verificação para estado limite de serviço (ELS) **17**
1.4.3 Ações nas estruturas de aço **17**
1.4.4 Dimensionamento à tração **19**
1.4.5 Dimensionamento à compressão **20**
1.4.6 Dimensionamento à flexão **25**
1.4.7 Dimensionamento à força cortante **26**
1.4.8 Dimensionamento à flexo-compressão **26**
1.5 ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO 27
1.5.1 Fundamentação legal **27**
1.5.2 Fenômeno da combustão **28**
1.5.3 Evolução de um incêndio **29**
1.5.4 Princípios da segurança contra incêndio **31**
1.5.5 Resistência do aço a altas temperaturas **33**
1.5.6 Resistência das estruturas à ação do fogo **33**
1.5.7 Dimensionamento em situação de incêndio **34**
1.5.8 Materiais de proteção térmica **43**

2 METODOLOGIA **49**

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA 49
2.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA 49

3 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS **51**

3.1 DEFINIÇÃO DO PÓRTICO PRINCIPAL 51
3.2 DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS 52
3.3 DETERMINAÇÃO DOS PERFIS ADOTADOS NO PÓRTICO 57
3.4 DIMENSIONAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO 57
3.4.1 Verificação da isenção de requisitos de resistência ao fogo **59**
3.4.2 Determinação do tempo requerido de resistência ao fogo, TRRF **59**
3.4.3 Determinação do fator de massividade (ou fator de forma) **60**

3.4.4 Determinação da temperatura do aço dos elementos estruturais 62
3.4.5 Determinação da temperatura crítica dos elementos estruturais 63
3.4.6 Dimensionamento do material de proteção 64
3.4.7 Dimensionamento da estrutura para situação de incêndio 69
3.5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 73
CONCLUSÕES 75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 77
ANEXOS 79

INTRODUÇÃO

O tema da pesquisa define-se em: a segurança das estruturas de aço em situação de incêndio.

Compreende este trabalho, a investigação da necessidade de proteção passiva contra fogo em estruturas de aço de acordo com a legislação e normalização brasileiras. Tem como objeto de investigação o quesito: Quais são as alternativas de proteção passiva contra o fogo em estruturas de aço?

O objetivo geral foi verificar o comportamento das estruturas de aço em situação de incêndio, com vistas à redução de suas propriedades físicas em função da elevação de temperatura e compará-los com os limites de resistência exigidos para manutenção da segurança e em seguida.

Como referência foi realizada a determinação dos limites de resistência ao fogo das estruturas de aço para um pavilhão industrial e os meios de proteção passiva e analisados os custos para diferentes soluções.

O tema em estudo apresenta-se de forma importante, pois construção em aço está cada vez mais presente no Brasil. Segundo estatísticas do Centro Brasileiro de Construção em Aço - CBCA e o Instituto Aço Brasil, no ano de 2010, edificações construídas em aço representaram 15% do total de construções, consumindo 2,8 milhões de toneladas de aço. Ainda em relação a esse segmento, as estatísticas da pesquisa industrial anual realizada pelo IBGE em 2009 indicam um crescimento de 12% ao ano em relação a 2002, em construções pré fabricadas, estruturas, pontes e torres.

Tendo em vista a preservação da vida humana em um incêndio, a segurança das estruturas expostas ao fogo devem ser garantidas a fim de propiciar a evacuação do local e evitar riscos à vida dos usuários e das equipes de combate e, em segundo plano a minimização de prejuízos materiais como a perda de mercadorias, documentos e ruína da própria estrutura.

Nos tempos atuais deve-se estar atentos às mudanças e avanços que ocorrem com maior freqüência. Na engenharia não seria diferente, e por isto é importante que se atente para a segurança contra incêndio em estruturas de aço, observando-se as normas brasileiras em vigor e as futuras que contemplam o âmbito da segurança contra incêndios.

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 HISTÓRICO DO AÇO

A primeira vez que o homem fez contato com elemento ferro, foi sob a forma de meteoritos, daí a etimologia da palavra siderurgia, cujo radical latino *sider* significa estrela ou astro. A literatura traz algumas estimativas do surgimento do ferro. As mais longínquas datam da ordem de 6 mil anos A.C., ocorrida em países como o Egito, Babilônia e Índia. O ferro era um material raro e em conseqüência, nobre, para a época, utilizado em adornos ou para fins militares; o seu uso em escala industrial ocorreu em meados do século XIX, principalmente na Europa, em países como França, Alemanha e Inglaterra. Com o aumento do uso do ferro, também foram desenvolvidas técnicas para conformação, como laminação de pranchas de ferro na Inglaterra e os perfis de seção I de ferro forjável, que ainda hoje é uma das peças mais usadas em construção de aço.

A primeira obra importante em aço, que existe até hoje, é a ponte sobre o rio Severn na Inglaterra, construída por um arco de elementos de ferro fundido, com um vão de 42 m, em 1779. Em 1872 foi construído o primeiro prédio com múltiplos andares em aço, próximo a Paris de autoria de Jules Saulnier, que na época já foi concebida com sistema de contraventamento que em alguns casos, é utilizado até hoje o mesmo sistema.

Na metade do século XIX, em 1856, a descoberta do inglês Henry Bessemer permite realizar uma produção realmente industrial de aço pelo refino do gusa. A partir dessa época, foram disponibilizados, de grandes quantidades desta liga ferro-carbono, que se chamava aço, cujas propriedades permitiram as maravilhas tecnológicas do século XX.

No Brasil a indústria siderúrgica teve início na década de 1920 com a criação da *Companhia Siderúrgica Belgo Mineira*. Em 1940 foi instituída a comissão executiva do plano siderúrgico que resultou da criação, ao final da 2ª guerra mundial, da *Companhia Siderúrgica Nacional- CSN* com a construção de uma usina localizada em Volta Redonda- RJ, e posteriormente, já na década de 1960, entraram em operação as usinas da *Usiminas* e

Companhia Siderúrgica Paulista - Cosipa e mais recentemente a *Gerdau Açominas* e grupo *Arcelor (Belgo, Acesita e CST).*

1.2 VANTAGENS DAS ESTRUTURAS METÁLICAS

1- Alta resistência do aço nos diversos estados de tensão, comparado com outros materiais.
2- O aço é um material homogêneo de produção controlada e características mecânicas bem definidas e de simples caracterização.
3- As estruturas são produzidas em fábricas por processos industrializados seriados, cujo efeito de escala favorece a menores prazos e menores custos.
4- Os elementos das estruturas metálicas podem ser desmontados e substituídos com facilidade e permitem também reforço quando necessário.
5- A possibilidade de reaproveitamento do material que não seja mais necessário à construção.
6- Economia nas fundações.

1.3 O AÇO E SUAS PROPRIEDADES

O aço pode ser definido como uma liga composta basicamente de ferro e pequenas quantidades de carbono, responsável por sua resistência. Na composição do aço também podem ser encontrados outros compostos como: enxofre, fósforo, manganês, etc. tais elementos podem melhorar suas propriedades mecânicas ou para fazê-lo adquirir propriedades especiais como resistência à corrosão e a altas temperaturas. Souza (2011, p.9) descreve que os aços utilizados na construção civil apresentam teor de carbono na ordem de 0,18% a 0,25%.

Suas principais propriedades são:

a) Elasticidade: propriedade do material a retornar à forma original, uma vez removida a força externa atuante;
b) Plasticidade: propriedade inversa à da elasticidade, do material não voltar à sua forma original;
c) Ductilidade: capacidade do material de deformar antes que ocorra a ruptura do mesmo;
d) Fragilidade: oposto a ductilidade, característica do material de romper bruscamente;
e) Resiliência: capacidade do material de absorver a energia mecânica em regime elástico;
f) Tenacidade: é a energia total, plástica ou elástica, que o material pode absorver até a ruptura;

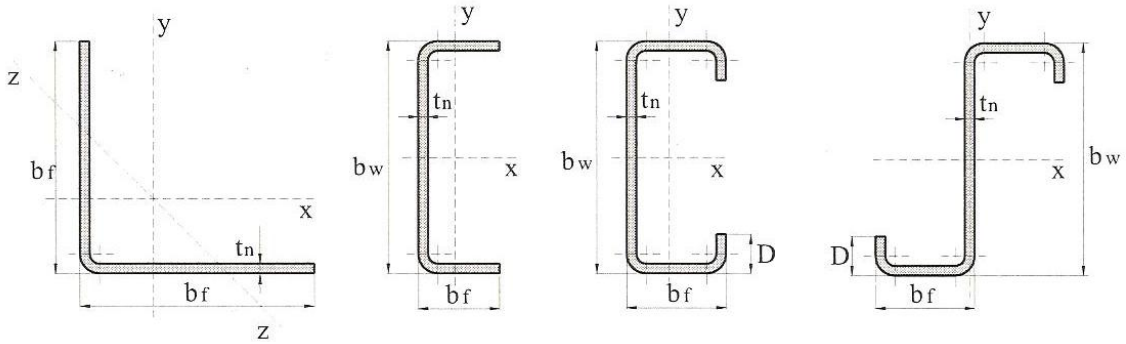
g) Fluência: ajustes plásticos que podem ocorrer em pontos de tensão, ao longo dos contornos dos grãos do material;

h) Fadiga: a ruptura do material sob esforços repetitivos ou cíclicos;

i) Dureza: resistência ao risco de abrasão.

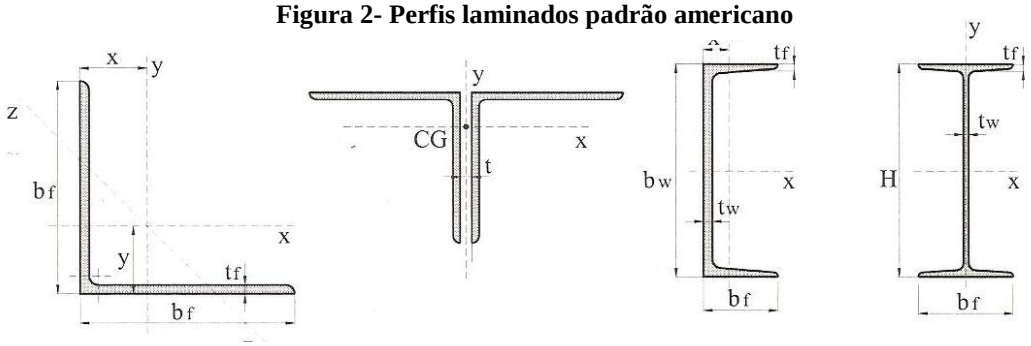
As estruturas metálicas em sua maioria são formadas por elementos lineares e as seções transversais desses elementos são denominadas de perfis. Segundo Souza (2011, p.12), os perfis estruturais podem ser classificados em três grupos em razão do processo de obtenção: perfis formados a fio, perfis laminados (padrão americano e padrão europeu de abas paralelas) e perfis soldados.

Figura 1- Perfis formados a frio



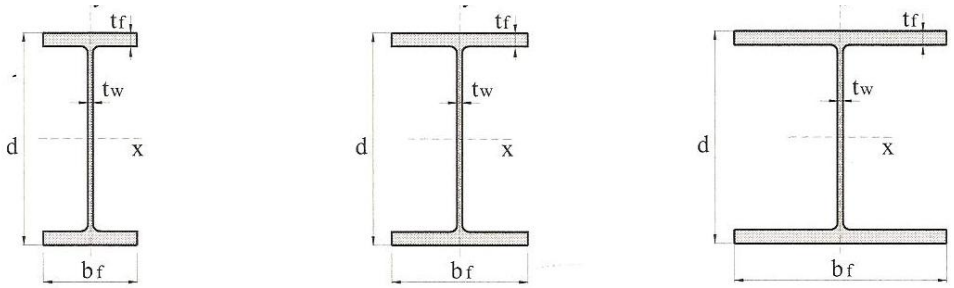
Fonte: Souza (2011, p.13)

Figura 2- Perfis laminados padrão americano



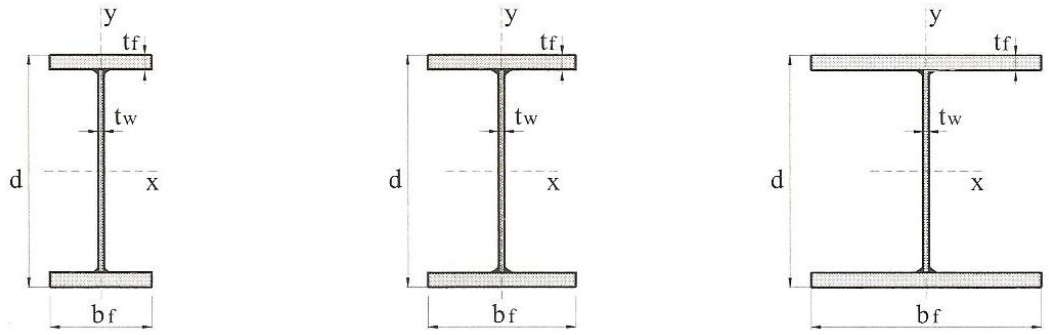
Fonte: Souza (2011, p.13)

Figura 3- Perfis laminados de abas planas



Fonte: Souza (2011, p.13)

Figura 4- Perfis soldados, VS, CVS e CS



Fonte: Souza (2011, p.13)

1.4 CRITÉRIOS DE PROJETO

> O dimensionamento de uma estrutura pressupõe o atendimento às funções para as quais foi concebida, considerando a vida útil estimada. Nesse sentido devem ser verificadas condições de segurança (estado limite último) e condições de desempenho em uso (estado limite de serviço). (SOUZA, 2011, p.8).

Para o projeto e dimensionamento de elementos estruturais em aço é importante conhecer as características do aço. A tabela 1 traz algumas constantes físicas do aço.

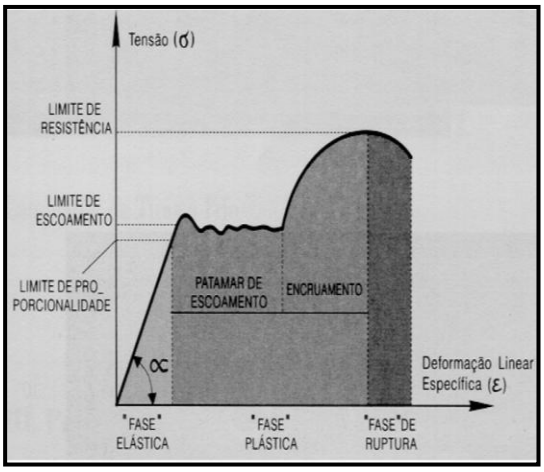
Tabela 1- Propriedades mecânicas do aço

Constantes físicas do aço	
Módulo de elasticidade	E=20000 k/cm²
Módulo de elasticidade transversal	G=7700 KN/cm²
Coeficiente de Poisson	$\nu = 0{,}3$
Coeficiente de dilatação térmica	$\beta_\alpha = 1{,}2x10^{-5}\ °C^{-1}$
Massa específica	$\rho_\alpha = 7850\ Kg/m^3$

Fonte: Souza (2011, p. 10)

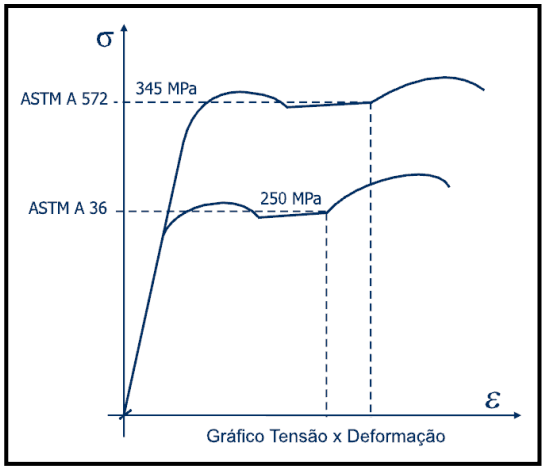
Bellei (2008, p. 44) define que "Todo projeto de estruturas de aço parte de algumas características mecânicas importantes que são o **Limite de Escoamento** e o **Limite de Ruptura"**. Tais propriedades podem ser verificadas através do ensaio de tração em corpos de prova padronizados. A NBR-8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios; representa o limite de escoamento por (f_y) e o de ruptura por (f_u). A figura 6 mostra o resultado típico de um ensaio de tração e a figura 5 mostra o resultado de dois aços comerciais amplamente utilizados.

Figura 5- Ensaio de tração



Fonte: Notas de aula (2011)

Figura 6- Ensaio de tração (Aços ASTM A36 e ASTM A572)



Fonte: Gerdau (2012)

Existem duas filosofias de projeto estrutural: a) projeto pelos estados limites; b) projeto pelas resistências admissíveis.

No Brasil utiliza-se o método dos estados limites, o qual é adotado pela NBR-8800:2008 e divide-se em duas categorias:

Estados Limites Últimos (ELU): considera a resistência da estrutura levando em consideração a ruína da mesma, fenômenos comportamentais como resistência dúctil, máxima flambagem, fadiga, fratura, torção e deslizamento.

Estados Limites de Serviço (ELS): considera os fatores de utilização da estrutura, com a ocorrência de deformações ou vibrações excessivas, provocando efeitos incompatíveis com as condições de uso da estrutura.

1.4.1 Verificação para estado limite último (ELU)

De acordo com Souza (2011, p. 15) a segurança estruturas é introduzida de forma qualitativa e expressa por:

$$S_d \leq R_d$$

Onde:

S_d representa as solicitações de cálculo, que são efeitos gerados por combinações apropriadas de ações de cálculos aplicadas à estrutura;

R_d representa a resistência de cálculo, que é o limite de resistência associado a uma determinada forma de colapso;

1.4.2 Verificação para estado limite de serviço (ELS)

As condições usuais referentes aos estados limites de serviço são expressas por:

$$S_{ser} \leq S_{lim}$$

Onde:

S_{ser} representa as solicitações de serviço, obtidas através das combinações de serviço;

S_{lim} representa os valores limites adotados para os efeitos estruturais dessas combinações.

1.4.3 Ações nas estruturas de aço

A NBR-8681:2003 é a norma das ações e segurança que serve de referência para as demais normas de projeto estrutural, incluindo a NBR-8800:2008

A NBR-8681:2003 define ações como causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas. São classificadas em:

• Ações permanentes: não variam ou tem pequena variação em torno de sua média, durante praticamente toda a vida da construção. São constituídas pelo peso próprio da estrutura e pesos próprios dos elementos construtivos fixos das instalações permanentes.

• Ações variáveis: ocorrem com valores que apresentam variações significativas em torno de sua média, durante a vida da construção. São exemplos: sobrecargas de utilização, ação do vento, pontes rolantes, e outros.

• Ações excepcionais: têm duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, mas que devem ser consideradas nos projetos de determinadas estruturas. Exemplos: impactos, explosões, ações sísmicas e outras.

Os pesos específicos de diversos materiais e sobrecargas (cargas acidentais) podem ser obtidos na NBR-6120:1980 - Cargas para cálculo em estruturas de edificações;

As ações variáveis específicas relativas ao uso e ocupação são apresentadas no anexo B da NBR-8800:2008;

Os esforços de vento podem ser determinados de acordo com a NBR-6123:1990 - Forças devidas ao vento em edificações;

A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura; a verificação dos estados-limites últimos e dos estados-limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e combinações de serviço, respectivamente.

1.4.3.1 Combinações de ações para os estados limites últimos

Segundo a NBR-8800:2008 em seu item 4.7.7.1 “Um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezáveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período prestabelecido”.

As combinações para (ELU) são classificadas em:

• **Combinações últimas normais**: Decorrem do uso normal previsto para a estrutura;

$$F_d = \sum_{i=1}^{m} (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n} (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k})$$

•**Combinações últimas especiais ou construtivas:**

$$F_d = \sum_{i=1}^{m} (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n} (\gamma_{qj} \psi_{0j,ef} F_{Qj,k})$$

• **Combinações últimas excepcionais**:

$$F_d = \sum_{i=1}^{m} (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + F_{Q,exc} + \sum_{j=1}^{n} (\gamma_{qj} \psi_{0j,ef} F_{Qj,k})$$

Souza (2011, p. 18) resume que tais equações representam o somatório das ações permanentes multiplicadas pelos respectivos coeficientes de ponderação + a ação variável principal multiplicada pelo seu coeficiente de ponderação + somatórios das demais ações variáveis multiplicadas pelos respectivos coeficientes de ponderação e combinação.

Os coeficientes de ponderação e combinação para cada carregamento podem ser encontrados nas tabelas 1 e 2 da NBR-8800:2008.

1.4.3.2 Combinações de ações para os estados limites de serviço

As combinações de serviço classificam-se de acordo com a sua permanência na estrutura:

• **Combinações quase permanentes**: são as que podem atuar durante grande parte da vida da estrutura, aproximadamente a metade, e são utilizadas para a aparência da construção e efeitos de longa duração.

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^{m} F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^{n} (\psi_{2j} F_{Qj,k})$$

• **Combinações freqüentes de serviço**: são aquelas que se repetem na ordem da 10^5 vezes em 50 anos, ou que tenham duração total igual 5 % da vida útil da estrutura. São utilizadas para os estados-limites que não causam danos permanentes e/ou relacionados ao conforto dos usuários, tais como vibrações, movimentos laterais, empoçamentos em coberturas e aberturas de fissuras.

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^{m} F_{Gi,k} + \psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n} (\psi_{2j} F_{Qj,k})$$

• **Combinações raras de serviço**: são aquelas que podem atuar no máximo algumas horas durante o período de vida da estrutura. Essas combinações são utilizadas para os estados-limites, que causam danos permanentes à estrutura ou a outros componentes da construção, e para aqueles relacionados ao funcionamento adequado da estrutura, tais como formação de fissuras e danos aos fechamentos.

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^{m} F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n} (\psi_{1j} F_{Qj,k})$$

Segundo Souza (2011, p. 19) nestas verificações devem ser dadas as entradas com os valores nominais das ações, ou seja, γ_f=1. Já nas combinações das ações de serviço devem ser usados os fatores de redução das ações ψ_1 e ψ_2.

Os coeficientes de ponderação e combinação para cada carregamento podem ser encontrados na tabela 2 da NBR-8800:2008.

1.4.4 Dimensionamento à tração

A resistência de cálculo à tração será o menor valor obtido nas seguintes expressões:

a) ELU de escoamento da seção bruta.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma}, \text{ com } \gamma=1{,}1$$

b) ELU de ruptura da seção líquida efetiva.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma}, \text{ com } \gamma=1{,}35 \quad \longrightarrow \quad A_e = C_t A_n$$

Onde:

f_y - resistência ao escoamento;

f_u - resistência à ruptura;

A_g - área bruta da seção;

A_n - área líquida da seção;

A_e - área líquida efetiva;

C_t - coeficiente de redução da área líquida;

γ - coeficientes de ponderação no escoamento e na ruptura (respectivamente);

$N_{t,Rd}$ - força normal resistente de cálculo à tração;

1.4.5 Dimensionamento à compressão

A resistência de cálculo à compressão, em que já se considera a possibilidade de escoamento da seção, flambagem local e global é data por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi\, Q\, A_g f_y}{\gamma}$$

Onde:

f_y – é a resistência ao escoamento do aço;

A_g – é a área bruta da seção;

χ - é o fator de redução associado à resistência à compressão;

Q - é o coeficiente de flambagem local;

γ - é o coeficiente de ponderação da resistência para compressão, igual a 1,10;

$N_{c,Rd}$ - força normal resistente de cálculo à compressão.

O (χ) fator de redução associado à resistência à compressão pela expressão

- para $\lambda_0 \leq 1{,}5$: $\chi = 0{,}658^{\lambda_0^2}$

- para $\lambda_0 > 1{,}5$: $\chi = \dfrac{0{,}877}{\lambda_0^2}$ $\longrightarrow$ $\lambda_0 = \sqrt{\dfrac{QA_g f_y}{N_e}}$

Onde:

λ_0 – é o índice de esbeltez reduzido;
N_e – é a força axial de flambagem elástica mais crítico;

O valor de χ pode ser também obtido da NBR-8800 (figura 11, ou tabela 4, p.45), para casos em que λ_0 não supere 3,0.

O coeficiente de flambagem local “Q”, é dividido em dois coeficientes:

Q_s - que é o coeficiente de redução da resistência devido a flambagem local em elementos apoiados e livres (AL)

Q_a - que é o coeficiente de redução da resistência devido a flambagem local em elementos apoiado e apoiados (AA).

Souza (2011, p. 58) explica que o coeficiente Q é obtido das seguintes maneiras:

Seções compostas apenas por AA e AL⟶ $Q=Q_s \cdot Q_a$

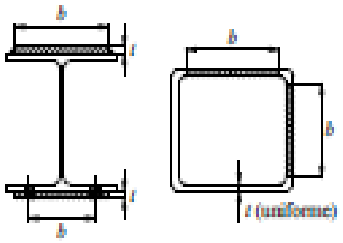
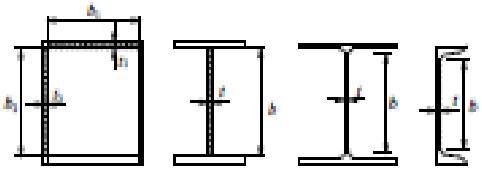
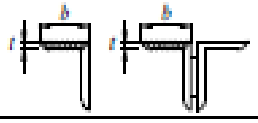
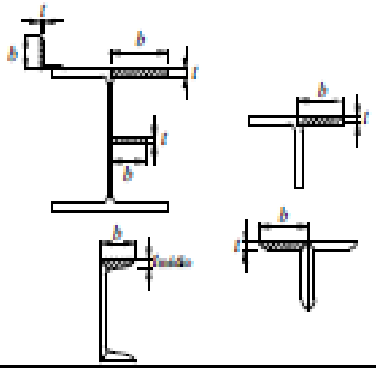
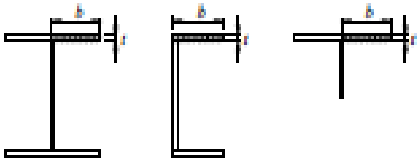
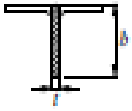
Seções compostas apenas por AL⟶ Q= é o menor dos coeficientes Q_s que compõem a seção;

Seções compostas apenas por AA⟶ Q= é o menor dos coeficientes Q_a que compõem a seção;

As barras submetidas à força axial de compressão, nas quais todos os elementos componente da seção transversal possuem relações (b/t) que não superam os valores (b/t)lim, tem fator de redução total Q igual a 1.00.

Para as barras submetidas à força axial de compressão, nas quais todos os elementos componente da seção transversal possuem relações (b/t) maiores que os valores (b/t)lim, deve-se determinar o parâmetros de flambagem local para elementos AA e AL de acordo com o quadro 1.

Quadro 1- Valores de $(b/t)_{lim}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de *b* e *t*	$(b/t)_{lim}$
AA	1	— Mesas ou almas de seções tubulares retangulares — Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas		$1{,}40\sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	— Almas de seções I, H ou U — Mesas ou almas de seção-caixão — Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1		$1{,}49\sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	— Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travejamento		$0{,}45\sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	— Mesas de seções I, H, T ou U laminadas — Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas — Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas		$0{,}56\sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	— Mesas de seções I, H, T ou U soldadas [a]		$0{,}64\sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$
	6	— Almas de seções T		$0{,}75\sqrt{\frac{E}{f_y}}$

[a] O coeficiente k_c é dado em F.2.

Fonte: ABNT (NBR-8800, p. 128)

Tabela 2- Expressões para o cálculo dos parâmetros de flambagem local (Q)

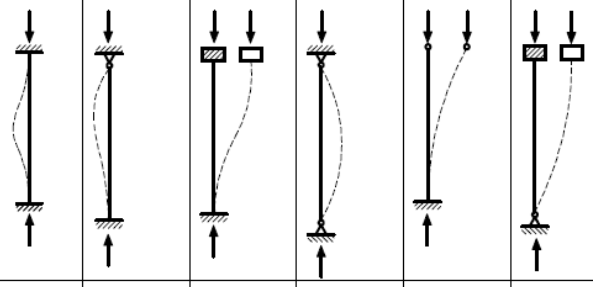
Elementos AL	Elementos AA
Elementos do grupo 3 – Tabela 5.3	$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}$ $A_{ef} = A_g - \sum(b - b_{ef})\,t$ $b_{ef} = 1{,}92\,t\sqrt{\frac{E}{\sigma}}\left[1 - \frac{c_a}{b/t}\sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right] \leq b$ $c_a = 0{,}38$ – para mesas e almas de seções tubulares retangulares; $c_a = 0{,}34$ – para todos os demais elementos AA; $\sigma = \chi f_y$ – tensão máxima que pode atuar na seção. O valor χ deve ser calculado inicialmente com Q = 1. De forma conservadora pode-se adotar $\sigma = f_y$
$Q_s = 1{,}340 - 0{,}76\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}}$ para $0{,}45\sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0{,}91\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $Q_s = \frac{0{,}53E}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}$ para $\frac{b}{t} > 0{,}91\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	
Elementos do grupo 4 – Tabela 5.3	
$Q_s = 1{,}415 - 0{,}74\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}}$ para $0{,}56\sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1{,}03\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $Q_s = \frac{0{,}69E}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}$ para $\frac{b}{t} > 1{,}03\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	
Elementos do grupo 5 – Tabela 5.3	
$Q_s = 1{,}415 - 0{,}65\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}$ para $0{,}64\sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} < \frac{b}{t} \leq 1{,}17\sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$ $Q_s = \frac{0{,}90Ek_c}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}$ para $\frac{b}{t} > 1{,}17\sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$ $k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}$, sendo $0{,}35 \leq k_c \leq 0{,}76$	
Elementos do grupo 6 – Tabela 5.3	Seções tubulares circulares
$Q_s = 1{,}908 - 1{,}22\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}}$ para $0{,}75\sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1{,}03\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $Q_s = \frac{0{,}69E}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}$ para $\frac{b}{t} > 1{,}03\sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$Q = 1{,}00$ se $\frac{D}{t} \leq 0{,}11\frac{E}{f_y}$ $Q = \frac{0{,}038}{D/t}\frac{E}{f_y} + \frac{2}{3}$ se $0{,}11\frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0{,}45\frac{E}{f_y}$ $\frac{D}{t} \leq 0{,}45\frac{E}{f_y}$
Simbologia h é a altura da alma; t_w é a espessura da alma; b e t são a largura e a espessura do elemento, respectivamente – Tabela 5.3; E é o módulo de elasticidade.	f_y é a resistência ao escoamento; b_{ef} é a largura efetiva do elemento; A_{ef} é a área efetiva da seção; A_g é área bruta da seção; D é o diâmetro de seções tubulares.

Fonte: Souza (2011, p. 60)

1.4.5.1 Flambagem

Segundo Souza (2011, p.43) a flambagem é um problema de estabilidade estrutural caracterizada pela ocorrência de grandes deformações transvasais em elementos submetidos a esforços de compressão. Explica ainda que na prática de projetos pode-se substituir o comprimento real do elemento por um comprimento fictício denominado comprimento eletivo de flambagem o qual é obtido pelo produto do comprimento da barra por uma constante representada pela letra “K”, que é função das condições dos apoios.

Quadro 2- Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres				

Fonte: ABNT (NBR-8800, 2008, p. 125)

De posse do comprimento efetivo é possível calcular o índice de esbeltez (λ) equacionado pela NBR-8800 como segue:

$$\lambda = \frac{KL}{r}$$

Onde:

K – coeficiente de flambagem;

L – é o comprimento destravado;

r – é o raio de giração da seção transversal.

Souza (2011, p. 46) deduz a equação da esbeltez limite de plastificação dada por:

$$\lambda_{pl} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}}$$

Portanto:

Em barras curtas com esbeltez $\lambda \leq \lambda_0$ não ocorre flambagem, havendo falha por plastificação.

Em barras longas com esbeltez $\lambda \geq \lambda_0$ ocorre flambagem em regime elástico.

1.4.6 Dimensionamento à flexão

De acordo com Souza (2011, p. 71) os estados limites aplicáveis à elementos submetidos à flexão são:

• **FLT:** Flambagem lateral com torção, sendo o menor das seguintes equações:

$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$ para $\lambda \leq \lambda_p$

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

$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$ para $\lambda > \lambda_p$

• **FLM:** Flambagem local de mesa e ;
• **FLA:** Flambagem local de alma;

Expressas por:

$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$ para $\lambda \leq \lambda_p$

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

$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}$ para $\lambda > \lambda_r$

Onde:
M_{Rd} - é o momento resistente de cálculo;
M_{pl} - é o momento de plastificação;
λ – é o índice de esbeltez;
λ_p – é o parâmetro de esbeltez limite para seções compactas;
λ_r – é o parâmetro de esbeltez para seções semi-compactas;
γ_{a1} - coeficiente de ponderação da resistência;

As expressões para a determinação dos parâmetros necessários para o cálculo do momento resistente podem ser encontradas na NBR-8800:2008.

1.4.7 Dimensionamento à força cortante

De acordo com Souza (2011, p.74) os modos de falha associados à força cortante em vigas são:

a) A plastificação da alma por cisalhamento;

$V_{pl} = 0{,}60\ \mathrm{A_w f_y}$

Onde:

$\mathrm{A_w}$ - é a área efetiva de cisalhamento

b) A flambagem da alma por cisalhamento;

$V_{Rd} = \frac{\mathrm{V_{pl}}}{\gamma_{a1}}$ para $\lambda \leq \lambda_p$

$V_{Rd} = \frac{\mathrm{V_p}}{\lambda}\frac{\mathrm{V_{pl}}}{\gamma_{a1}}$ para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$V_{Rd} = 1{,}24\left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 \frac{\mathrm{V_{pl}}}{\gamma_{a1}}$ para $\lambda > \lambda_r$

1.4.8 Dimensionamento à flexo-compressão

Souza (2011, p.83) explica que após verificar isoladamente os esforços de compressão e flexão deve-se verificar a iteração desses dois esforços através das seguintes equações de iteração:

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0{,}2 \quad \longrightarrow \quad \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}}\right) \leq 1{,}0$

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0{,}2 \quad \longrightarrow \quad \frac{N_{sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}}\right) \leq 1{,}0$

Onde:

$\mathrm{N_{sd}}$ - é a força axial solicitante de cálculo de compressão;

$\mathrm{N_{Rd}}$ - é a força axial resistente de cálculo de compressão;

$M_{Sd,x}$ e $M_{Sd,y}$ – são os momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos x e y respectivamente, da seção transversal;
$M_{Rd,x}$ e $M_{Rd,y}$ – são os momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y respectivamente, da seção transversal;

1.5 ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

1.5.1 Fundamentação legal

A história registra no mundo muitas catástrofes ocorridas por incêndios, a exemplo do grande incêndio de Londres em 1666 destruindo partes centrais da cidade durante três dias consecutivos. No Brasil ocorreram grandes tragédias como:

1961 – Incêndio no Gran Circo Norte-americano, na cidade de Niterói/RJ, com 503 mortos, sendo 70% crianças.

1972 – Edifício Andraus (32 andares), na cidade de São Paulo/SP, com 16 mortos e 33 feridos.

1973 – Lojas Americanas, na cidade de Porto Alegre/RS, 5 mortos

1974 – Edifício Joelma (25 andares), na cidade de São Paulo/SP, com 188 mortos e mais de 300 feridos.

1976 – Lojas Renner (7 andares), na cidade de Porto Alegre/RS, 41 mortos e 60 feridos.

1981 – Edifício Grande Avenida, na cidade de São Paulo/SP, 17 mortos e 53 feridos.

1886 – Edifício Andorinhas, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, com 21 mortos e mais de 50 feridos.

Fev/2012 – Incêndio na base militar brasileira de pesquisas na Antártida, 02 mortos e destruição de 40% da pesquisa brasileira, sobre mudança climática e a interação do continente com o resto do planeta.

Frente ao impacto de tais sinistros, nas décadas de 1970 teve inicio um período de preocupação com a segurança contra incêndios, onde temos como exemplo algumas legislações e normas que começam a surgir:

1976 – Decreto estadual do RJ nº 897 - Segurança contra incêndio e pânico;

1980 – Publicação da NBR-5627: Exigências particulares de obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo;

1980 – Publicação da NBR-5628: Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo;

1990 – Lei federal nº 8078: código de defesa do consumidor; (obrigatoriedade de seguir as normas técnicas para produtos e serviços):

> Art. 39. É vedado ao fornecedor de produtos ou serviços, dentre outras práticas abusivas:
>
> VIII - colocar, no mercado de consumo, qualquer produto ou serviço em desacordo com as normas expedidas pelos órgãos oficiais competentes ou, se normas específicas não existirem, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ou outra entidade credenciada pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro);

1997 – Lei estadual do RS nº 10987 – Prevenção e proteção contra incêndios;

1998 – Decreto 38.273/RS – Aprova as normas técnicas de prevenção contra incêndios;

> Art. 15 - Nas edificações com mais de uma classe de risco, poderá ser empregado o sistema de isolamento de riscos, nas edificações, com a finalidade de definir os sistemas e equipamentos de proteção contra incêndio.
> § 1º - O isolamento de riscos poderá ser obtido por compartimentação, sendo que nos casos de risco grande e médio a resistência ao fogo deverá ser de quatro horas e nos de risco pequeno resistência de duas horas;

1999 - Publicação da NBR-14323: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio;

2000 – Publicação da NBR-14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento;

2001 – Decreto estadual de SP nº 46076 – Segurança contra incêndio em edificações;

O estado de São Paulo caracteriza-se muitas vezes por avanços na legislação de segurança contra incêndios. Onde, a Instrução Técnica número 08/01 do Corpo de Bombeiros, substitui a NBR- 14432, complementando-a em alguns casos e apresentando pequenas alterações em outros.

1.5.2 Fenômeno da combustão

Silva (2010, p.14), define fogo como resultado de um processo exotérmico de oxidação. Geralmente um composto orgânico como o papel, a madeira, plásticos, gás de hidrocarbonetos, gasolina e outros, susceptíveis a oxidação, em contato com uma substância comburente, como o oxigênio do ar, por exemplo, ao atingirem a energia de ativação, também

conhecida como temperatura de ignição entram em combustão. Iniciada a reação de combustão ou queima, o calor desprendido pela reação mantém o processo em atividade. Devem existir quatro componentes para a ocorrência da combustão ou queima, são:

• Combustível: qualquer substância capaz de produzir calor por meio de reação química da combustão;

• Comburente: substância que alimenta a reação química da combustão (o oxigênio é a mais comum);

• Calor: energia térmica que se transfere de um sistema para outro em virtude da diferença de temperatura entre os dois;

• Reação em cadeia: a seqüência dos três eventos acima, que resulta na combustão propriamente dita.

A figura 7 representa graficamente tais elementos através do chamado tetraedro do fogo.

Figura 7- Tetraedro do fogo

Fonte: Site Areaseg

1.5.3 Evolução de um incêndio

Do dicionário, “incêndio é uma ocorrência de fogo não controlado, que pode ser extremamente perigosa para os seres vivos e as estruturas”. A exposição a um incêndio pode produzir a morte, geralmente pela inalação dos gases, ou pelo desmaio causado por eles, ou posteriormente pelas queimaduras graves.

Um incêndio não se inicia em grades proporções, Panonni (2007) explica que de modo geral, passa por uma fase de progressão, com grande liberação de calor, seguida pela fase de

regressão, quando a temperatura volta a baixar. De acordo com o modo de inflamação e a natureza do combustível, o desenvolvimento será mais ou menos rápido, estando a sua duração principalmente relacionada a quantidade de material combustível existente no ambiente.

A principal característica de um incêndio, no que diz respeito ao estudo das estruturas, é a curva que fornece a temperatura dos gases em função da progressão do sinistro. Esta curva, mostra três regiões distintas:

1. Fase inicial ou período de iniciação, no qual ocorre o surgimento da ignição e a temperatura média do compartimento é relativamente baixa e o fogo está localizado próximo à sua origem. Existe a possibilidade do material envolvido se queimar completamente sem transmitir o calor a outros materiais, devido as condições de ventilação, afastamento ou a diferentes propriedades dos materiais presentes no ambiente. Nesse caso o incêndio não passaria desta fase.

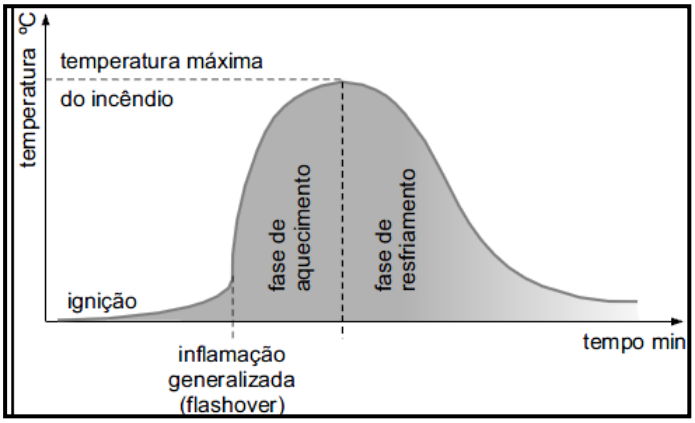
2. Fase de aquecimento brusco, caso o fogo consiga se propagar, por convecção ou radiação, poderá ocorrer a repentina elevação da temperatura no local, com o rápido desenvolvimento de fumaça e gases inflamáveis, ocasionado pela combustão simultânea de vários materiais envolvidos. Com a oxigenação do local, devido às aberturas como portas e janelas, e à constante inflamação dos objetos, há um aumento cada vez maior da temperatura interna. Pode-se chegar a um momento em que o incêndio atinge a sua inflamação generalizada, ou “flashover” – o ambiente passa a ser completamente tomado pelas chamas e os gases quentes, que são emitidos através de portas e janelas e se queimam no exterior do edifício, em contato com o ar. O tempo para se atingir o “flashover” pode ser relativamente curto e depende, basicamente, das características dos materiais de revestimento e acabamento usados no ambiente de origem do fogo. A partir daí, o incêndio pode se propagar para outros compartimentos do edifício por convecção de gases quentes, seja pelo interior da edificação ou pelo exterior (o fogo pode atingir pavimentos superiores através das aberturas como janelas). A fumaça espalha-se pelo edifício desde a fase anterior à inflamação generalizada, movimentando-se em sentido ascendente. A presença da fumaça e dos gases quentes faz com que as condições de sobrevivência tornem-se críticas antes mesmo do local ser atingido pelas chamas. Dependendo da intensidade do incêndio e da proximidade das edificações vizinhas, o incêndio pode ser transmitido por radiação para as construções adjacentes.

Caso a edificação tenha medidas de combate a incêndio (brigada de incêndio, sprinklers, etc.) eficientes para extinguir o fogo antes do “flashover”, a segurança da estrutura será pouco afetada em situação de incêndio, conforme o gráfico da Figura 2.6, que demonstra

a influência dos “sprinklers” sobre a curva temperatura-tempo de um incêndio. Mas, devido à dificuldade de ajuizar-se essa situação com precisão, é comum dimensionar-se as estruturas dos edifícios de maior risco para a máxima temperatura do incêndio, ou seja, admitindo-se a ocorrência do “flashover”.

3. Fase de resfriamento e extinção devido ao total consumo do combustível presente no local ou à falta de oxigênio, o incêndio terá sua intensidade reduzida, entrando na fase de resfriamento e, em seguida, extinguir-se-á.

Figura 8- Curva temperatura x tempo de um incêndio real



Fonte: Vargas (2003, p. 15)

1.5.4 Princípios da segurança contra incêndio

Silva (2001, p. 67) relata que a probabilidade de acidente fatal em incêndios é cerca de 30 vezes menor do que o risco de morte no sistema de transporte e que as mortes acontecem principalmente por asfixia nos primeiros minutos do incêndio. O risco à vida devido ao colapso estrutural em função de um incêndio em edifícios dimensionados de maneira adequada à temperatura ambiente e equipados com dispositivos apropriados à segurança é, ainda menor, porém a proteção a vida humana deve ser sempre considerada no projeto de uma edificação. Tal fato é, inclusive, previsto em normas e regulamentos legais e exigido pelo poder público.

Quadro 3- Comparação estatística das mortes entre diferentes causas de acidentes

Risco	Probabilidade de acidente fatal por pessoa com estimativa de vida de 75 anos
Acidente de trânsito	1:50
Incêndios em edifícios	1:1500

Fonte: Plank (1996, apud Vargas 2003, p. 10)

A premissa fundamental da segurança contra incêndio é reduzir o risco à vida e minimizar a perda do patrimônio.

> ...pode-se considerar que as preocupações se segurança contra incêndio em uma edificação se referem a três objetivos fundamentais, que são, por ordem decrescente de importância:
> 1. A proteção das vidas dos ocupantes do edifício, bem como dos bombeiros que nele tenham de atuar em caso de sinistro;
> 2. A proteção dos bens existentes no edifício e das atividades que se desenvolvem no mesmo; A proteção do próprio edifício contra danos de incêndios que possam se deflagrar nele ou em edifícios vizinhos.
> 3. A segurança em caso de incêndio depende, principalmente, das condições de evacuação das pessoas e das condições para se evitar a propagação de fumos e gases, que são as causas principais das perdas de vidas humanas. As falhas estruturais têm importância muito menor neste aspecto, e somente tem caráter relevante quando podem ocasionar problemas para a evacuação das pessoas. Pannoni (2007).

Vargas e Silva (2003, p.10) definem que "Entende-se como risco à vida, a exposição severa à fumaça ou ao calor dos usuários da edificação e o eventual desabamento de elementos construtivos sobre os usuários ou sobre a equipe de combate."

Um sistema de segurança contra incêndio apropriado consiste de um conjunto de sistemas e medidas de proteção ativa e passiva.

A NBR-14432:2001 traz as definições para proteção ativa e passiva:

- **Proteção ativa**: tipo de proteção contra incêndio que é ativada manual ou automaticamente em resposta aos estímulos provocados pelo fogo, composta basicamente das instalações prediais de proteção contra incêndio.

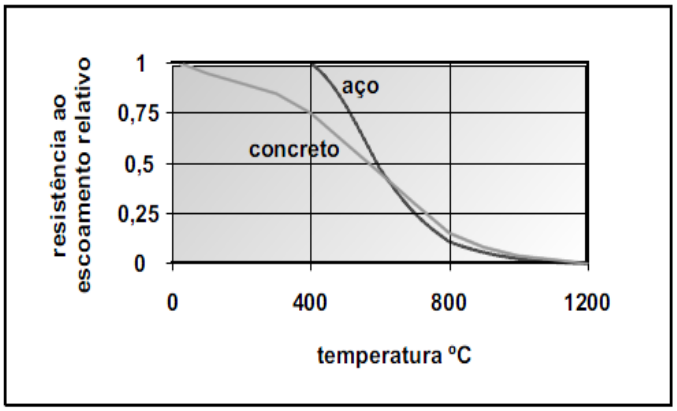
- **Proteção passiva**: conjunto de medidas incorporado ao sistema construtivo do edifício, sendo funcional durante o uso normal da edificação e que reage passivamente ao desenvolvimento do incêndio, não estabelecendo condições propícias ao seu crescimento e propagação, garantindo a resistência ao fogo, facilitando a fuga dos usuários e a aproximação e o ingresso no edifício para o desenvolvimento das ações de combate.

Vargas (2003) exemplifica os ativos como sendo os sistemas de detecção, chuveiros automáticos, extintores, etc... E os passivos, a resistência ao fogo das estruturas, a compartimentação, saídas de emergência, etc...

1.5.5 Resistência do aço a altas temperaturas

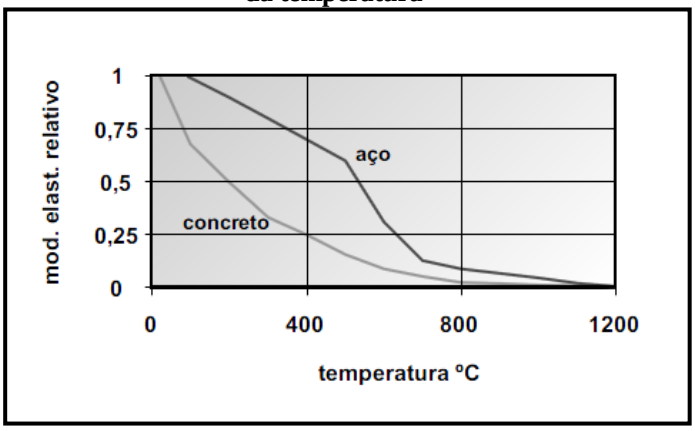
O aço, assim como outros materiais estruturais, quando submetido a altas temperaturas sofre redução da sua resistência (figura 9) e da sua rigidez (figura 10). Nesse caso excepcional, tais reduções devem ser consideradas no dimensionamento das estruturas em situação de incêndio, para a garantia da segurança requerida.

Figura 9- Redução da resistência ao escoamento do aço frente a temperatura



Fonte: Vargas (2003, p. 14)

Figura 10- Redução do módulo de elasticidade em função da temperatura



Fonte: Vargas (2003, p.14)

1.5.6 Resistência das estruturas à ação do fogo

A NBR-8800, considerada segura, a estrutura projetada de tal forma que não exceda nenhuma das combinações de ações dos estados limites em condições normais de

carregamento, ou seja é aquela que tem grande probabilidade de resistir aos esforços normais provenientes das ações externas, por exemplo, do vento e da gravidade.

Segundo Vargas (2003, p.14) “Uma estrutura considerada segura na condição excepcional de um incêndio é aquela que, com ou sem proteção contra incêndio, tem grande probabilidade de resistir aos esforços solicitantes em temperatura elevada, de forma a evitar o seu colapso.”

A capacidade resistente da estrutura vai depender fortemente do comportamento do material estrutural utilizado, ou seja, do grau de variação de suas propriedades físicas e mecânicas com a temperatura.

Panoni (2007) explica que o aço imerso num ambiente de temperatura homogênea e sob carga total começará a perdes sua margem de segurança definida em projeto, iniciando o processo de flambagem localizada.

1.5.7 Dimensionamento em situação de incêndio

A definição de dimensionamento em situação de incêndio é apresentada na NBR-14323:1999:

> 1.2 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.

Tendo em vista a pequena probabilidade de ocorrência do incêndio a NBR-14323:1999 determina em seu item 6.2.1. que as combinações para os estados limites últimos em situação de incêndio devem ser consideradas como combinações última excepcionais, logo, tal definição é oportuna pois caso contrario tornaria anti-econômico tal projeto.

> Desse modo, sob incêndio, os valores desses esforços, devidos à ação do peso próprio, da sobrecarga e do vento, entre outros, devem ser minorados em relação aos utilizados à temperatura ambiente. Essa redução dos valores de cálculo dos esforços torna o dimensionamento mais realístico em situação de incêndio. Silva (2003,p.16).

Ocorre que, se por um lado há uma redução de resistência no aço frente à elevação de temperatura, por outro há redução no valor do cálculo dos esforços advindos das ações externas à estrutura.

De acordo com Silva (2003), “A temperatura que causa o colapso de um elemento estrutural, em situação de incêndio, é denominada temperatura crítica, sendo essa intimamente relacionada ao carregamento aplicado ao elemento”.

Como exemplo, pode-se citar uma viga simplesmente apoiada, submetida apenas ao seu peso próprio, a qual terá uma temperatura crítica maior do que outra idêntica porém submetida a mais carregamentos (ex.: laje + sobrecarga), uma vez que no primeiro caso ela necessita de um grau de redução da resistência maior, para entrar em colapso.

A ação térmica na estrutura é fator determinante para se obter redução das propriedades do aço, porém tendo em vista as diferentes fases de um incêndio, como visto em 1.5.2., torna-se necessário conhecer a curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo. A curva temperatura-tempo real de um incêndio é difícil de ser estabelecida pois é peculiar a cada edificação e depende do:

• tipo e quantidade e distribuição da carga de incêndio (material combustível presente no compartimento em chamas).

• grau de ventilação do compartimento calculado a partir das dimensões das aberturas (janelas, portas) para o ambiente externo.

• tipo de material e espessura dos elementos de vedação do compartimento.

Para se verificar a segurança estrutural dos elementos de aço de uma edificação, em situação de incêndio, é necessário conhecer a exigência de resistência do fogo para cada tipo de elemento (vigas, pilares e lajes) conforme preconiza a norma NBR 14432:2001 ou legislação local (quando existir).

Tabela 3- Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), em minutos- NBR-14432

Grupo	Ocupação/Uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S2	Classe S1	Classe P1	Classe P2	Classe P3	Classe P4	Classe P5
			hs > 10 m	≤ 10 m	h ≤ 6 m	6 m < h ≤ 12 m	12 m < h ≤ 23 m	23 m < h ≤ 30 m	h > 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultural física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5,F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 aberto lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industriais	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Altura da edificação: distância compreendida entre o ponto que caracteriza a saída situada no nível de descarga do prédio e o piso do último pavimento, excetuando-se zeladorias, barrilete, casa de máquinas, piso técnico e pisos sem permanência humana.

Fonte: Bellei (2008, p.213)

Tendo em vista, a enorme variabilidade da curva temperatura-tempo do incêndio, pois se altera para cada situação estudada, convencionou-se adotar uma curva padronizada de temperatura x tempo de incêndio, denominada “modelo do incêndio padrão”, como modelo para a análise experimental de estruturas, materiais de proteção térmica, portas corta-fogo, etc., em fornos. Segundo a NBR-14432:2001 incêndio padrão é a elevação padronizada de temperatura em função do tempo, cuja expressão matemática é a seguinte:

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

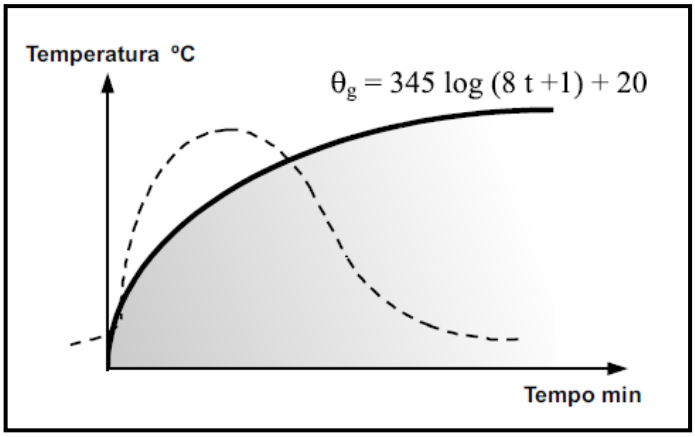
Onde:

t é o tempo, em minutos

θ_0 é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20°C

θ_g é a temperatura dos gases, em graus Célsius, no instante t

Figura 11- Modelo de incêndio padrão



Fonte: Vargas (2003, p.16)

É importante ressaltar, que essa curva não representa um incêndio real. Quaisquer conclusões, que tenham por base essa curva, devem ser analisadas com cuidado, pois não correspondem ao comportamento real do incêndio ou das estruturas expostas ao fogo. Silva (2003)

A temperatura atuante no elemento estrutural é inferior à temperatura dos gases quentes. A NBR-14323:1999 possibilita o cálculo em função do tempo de exposição ao incêndio-padrão, por meio de métodos analíticos, de modo experimental ou com técnicas semi-empíricas (também conhecidas como técnicas avançadas).

Quando a segurança é verificada isoladamente em relação a cada uma dos esforços atuantes, a capacidade estrutural de resistência é dada por:

$$S_{fi,d} \leq R_{fi,d}$$

Onde:

$S_{fi,d}$ - é a solicitação de cálculo em situação de incêndio.

$R_{fi,d}$ - é a resistência de cálculo correspondente do elemento estrutural para o ELU em consideração em situação de incêndio.

Vargas (2003, p.16) coloca que "É costume, em códigos e normas nacionais e internacionais, ao invés de se exigir segurança à temperatura, exigir-se segurança por um determinado tempo, associado à curva-padrão".

No Brasil NBR 14432:2001 estabelece os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), ou seja, o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo, quando sujeito ao incêndio padrão, mantendo propriedades de segurança estrutural, estanqueidade e isolamento dependendo do caso.

1.5.7.1 Combinações para ELU

A NBR-14323:99 estabelece as combinações de ações para os estados limites últimos em situação de incêndio devem ser consideradas como combinações últimas excepcionais e obtidas de acordo com a NBR-8681, expressas da seguinte forma:

• **Combinações últimas excepcionais**:

a) Em locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, nem elevadas concentrações de pessoas:

$$\sum_{i=1}^{n} \gamma_{gi} F_{Gi} + F_{Q,exc} + 0{,}2 F_Q$$

b) Em locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas:

$$\sum_{i=1}^{n} \gamma_{gi} F_{Gi} + F_{Q,exc} + 0{,}4 F_Q$$

c) Em bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens:

$$\sum_{i=1}^{n} \gamma_{gi} F_{Gi} + F_{Q,exc} + 0{,}6 F_Q$$

Onde:

F_{Gi} - é o valor nominar da ação permanente.

$F_{Q,exc}$ - é o valor nominal das ações térmicas.

F_Q - é o valor nominal das ações variáveis devidas as cargas acidentais.

γ_g - é o valor do coeficiente de ponderação para ações permanentes igual a:

1,1 para ação permanente desfavorável de pequena variabilidade;

1,2 para ação permanente desfavorável de grande variabilidade;

1,0 para ação permanente favorável de pequena variabilidade;

0,9 para ação permanente favorável de grande variabilidade;

1.5.7.2 Elevação da temperatura do aço

Segundo Vargas (2003, p.27), a diferença de temperatura entre as chamas e o elemento estrutural gera um fluxo de calor que transfere-se para a estrutura via radiação e convecção. Para determinação da distribuição uniforme de temperatura na seção transversal a NBR-14323 apresenta, em seu item 8.5.5.1, a seguinte expressão:

$$\Delta\theta_{a,t} = \left(\frac{u\,/A}{C_a \rho_a}\right) \varphi \Delta t$$

Onde:

$u\,/A$- é o fator de massividades para elementos estruturais de aço sem proteção contra incêndio em um por metro;

ρ_a - é a massa específica do aço em Kg/m³;

C_a - é o calor específico do aço em J/Kg/°c;

φ - é o valor do fluxo de calor por unidade de área em watt/m²;

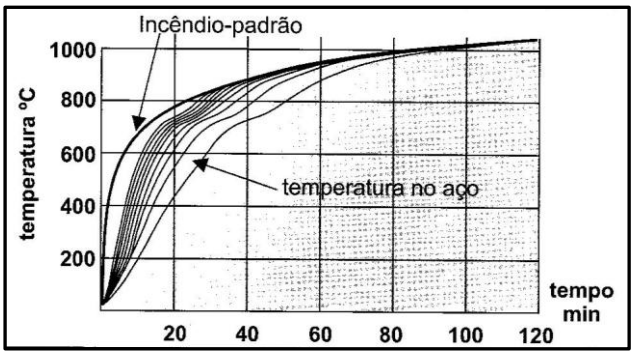
Vargas (2003, p. 27) exemplifica o roteiro para determinação da temperatura de um elemento de aço de acordo com a expressão acima:

1) admite-se $\theta_a(0) = 20°C$;
2) toma-se $\Delta t = 5$ segundos ;

3) determina-se $\theta_g(t) = 345\, log_{10}(8t + 1) + 20$;
4) determina-se $\varphi_r(t) = 5{,}7.10^{-8}0{,}5\left(\left(\theta_g(t) + 273\right)^4 - (\theta_a + 273)^4\right)$;
5) determina-se $\theta_c(t) = 25\left(\theta_g(t) - \theta_a(t - \Delta_t\right)$;
6) determina-se $\varphi = \varphi_r + \varphi_c$;
7) determina-se $\Delta\theta_a = \left(\frac{u\,/A}{C_a\rho_a}\right)\varphi\Delta t$, sendo u/A o fator de massividade do elemento calculado conforme anexo "D" da NBR-14323, ρ_a=7850 kg/m³ e C_a=600 J/kg/°C;
8) determina-se $\theta_a(t) = \theta_a(t - \Delta_t) + \Delta_\theta$;
9) volta-se ao item 3 com $t + \Delta_t$ no lugar de Δ_θ;

A figura 12 apresenta os resultados das temperaturas nos elementos de aço considerando os passos 1 a 9.

Figura 12- Temperatura do elemento de aço, tendo por base o modelo do incêndio padrão.



Fonte: Vargas (2003, p. 28)

A NBR-14323 traz em sua tabela 1 os fatores de redução para o aço em função da temperatura. De posse de tais fatores é possível efetuar as verificações de segurança estabelecidos na mesma.

Quadro 4- Fatores de redução para o aço

Temperatura do aço em ºC	Fator de redução para o limite de escoamento dos aços laminados a quente K_y , θ	Fator de redução para o limite de escoamento dos aços trefilados K_{yo} , θ	Fator de redução para o módulo de elasticidad de todos os tipos de aços K_E , θ
20	1,000	1,000	1,0000
100	1,000	1,000	1,0000
200	1,000	1,000	0,9000
300	1,000	1,000	0,8000
400	1,000	0,940	0,7000
450	0,930	0,800	0,6300
500	0,780	0,670	0,6000
550	0,630	0,530	0,4500
600	0,470	0,400	0,3100
650	0,330	0,250	0,2200
700	0,230	0,120	0,1300
800	0,110	0,110	0,0900
850	0,070	0,100	0,0800
900	0,060	0,060	0,0675
1000	0,040	0,050	0,0450
1100	0,020	0,030	0,0255
1200	0,000	0,000	0,0000

Fonte: Bellei (2008, p. 2000)

1.5.7.3 Barras tracionadas

Segundo a NBR-13423 a resistência de cálculo para uma barra axialmente tracionada é expressa por:

$$N_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} K_{y,\theta}, A_g f_y$$

Onde:

$N_{fi,Rd}$ - é a resistência de cálculo a esforços normais de tração;

$K_{y,\theta}$ - é o fator de redução do limite de escoamento do aço a temperatura θ_a;

A_g - é a área bruta da seção transversal da barra;

1.5.7.4 Barras comprimidas

Segundo a NBR-13423 a resistência de cálculo para uma barra axialmente comprimida, cujos elementos componentes não transversal não possuam relações superiores aos valores dados na tabela 1 da NBR-8800 para seções classe 3, é expressa por:

$$N_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} \frac{\rho_{fi} K_{y,\theta}\ A_g\ f_y}{K_a}$$

Onde:

$N_{fi,Rd}$ - é a resistência de cálculo a esforços normais de compressão;

$K_{y,\theta}$ - é o fator de redução do limite de escoamento do aço a temperatura θ_a;

A_g - é a área bruta da seção transversal da barra;

K_a - é um fator de correção empírico da resistência da barra em temperatura elevada, cujo valor é dado em 8.4.2.4 da NBR-14323;

ρ_{fi}- é o fator de redução da resistência à compressão em situação de incêndio, determinado conforme 8.4.2.3 da NBR-14323;

1.5.7.5 Barras fletidas

A resistência de cálculo ao momento fletor de barras fletidas, exceto seções transversais em forma de "T" é dada por:

Para FLM e FLA

Se $\lambda \leq \lambda_{p,fi} \longrightarrow M_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} K_1 K_2 K_{y,\theta} M_{pl}$

Se $\lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi} \longrightarrow M_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} K_1 K_2 K_{y,\theta} \left[M_{pl} - \left(M_{pl} - M_r \right) \frac{\lambda - \lambda_{p,fi}}{\lambda_{r,fi} - \lambda_{p,fi}} \right]$

Para FLT

Se $\lambda \leq \lambda_{p,fi} \longrightarrow M_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} K_1 K_2 K_{y,\theta} M_{pl}$

Se $\lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi} \longrightarrow M_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} \frac{K_{y,\theta}}{1,2} \left[M_{pl} - \left(M_{pl} - M_r \right) \frac{\lambda - \lambda_{p,fi}}{\lambda_{r,fi} - \lambda_{p,fi}} \right]$

Se $\lambda > \lambda_{r,fi} \longrightarrow M_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} \frac{K_{E,\theta} M_{cr}}{1,2}$

Onde:

$K_{y,\theta}$ - é o fator de redução do limite de escoamento do aço a temperatura θ_a;

$K_{E,\theta}$ - é o fator de redução do módulo de elasticidade do aço à temperatura θ_a;

M_{cr} - é o momento fletor de flambagem elástica em temperatura ambiente;

M_{pl} - é o momento de plastificação da seção transversal para projeto em temperatura ambiente;

M_r - é o momento fletor correspondente ao inicio do escoamento da seção transversal para projeto em temperatura ambiente;

K_1 - é um o fator de correção para temperatura não uniforme na seção transversal;

K_2 - é um fator de correção para temperatura não uniforme ao longo do comprimento da barra;

1,2 – é um fator de correção empírico da resistência da barra em temperatura elevada.

1.5.7.6 Esforço cortante

A resistência de cálculo a força cortante para perfis I, U, H e caixão em situação de incêndio é dada por:

Se $\lambda \leq \lambda_{p,fi} \quad \longrightarrow \quad V_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} K_1 K_2 K_{y,\theta} V_{pl}$

Se $\lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi} \quad \longrightarrow V_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} K_1 K_2 K_{y,\theta} \frac{\lambda_{p,fi}}{\lambda} V_{pl}$

Se $\lambda > \lambda_{r,fi} \quad \longrightarrow \quad V_{fi,Rd} = \Phi_{fi,a} K_1 K_2 K_{y,\theta} (1{,}28) \left(\frac{\lambda_{p,fi}}{\lambda}\right)^2 V_{pl}$

Onde:

λ - é o parâmetro de esbeltez da alma, determinado conforme NBR-8800;

$\lambda_{p,fi}$ - é o parâmetro de esbeltez da alma correspondente a plastificação em situação de incêndio determinado conforme 8.4.3.9 da NBR-14323;

$\lambda_{r,fi}$ - é o parâmetro de esbeltez da alma correspondente ao inicio do escoamento em situação de incêndio determinado conforme 8.4.3.9 da NBR-14323;

V_{pl} - é a força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento determinada conforme NBR-8800.

1.5.7.7 Flexo-compressão

Para os esforços combinados de força normal de tração ou compressão e momentos fletores, deve ser atendida a expressão de interação:

$$\frac{N_{fi,Sd}}{N_{fi,Rd}} + \frac{M_{x,fi,Sd}}{M_{x,fi,Rd}} + \frac{M_{y,fi,Sd}}{M_{y,fi,Rd}} \leq 1{,}0$$

Onde:

$N_{fi,Sd}$ - é a força normal solicitante de cálculo na barra;

$N_{fi,Rd}$ - é a resistência de cálculo à força normal;

$M_{x,fi,Sd}$ - é o momento fletor de cálculo, na seção considerada , em torno do eixo x;

$M_{y,fi,Sd}$ - é o momento fletor de cálculo, na seção considerada , em torno do eixo y;

$M_{x,fi,Rd}$ - é o momento fletor resistente de cálculo, em torno do eixo x;

$M_{y,fi,Rd}$ - é o momento fletor resistente de cálculo, em torno do eixo y;

1.5.8 Materiais de proteção térmica

Uma estrutura ao ser verificada em situação de incêndio pode exigir alterações para atender a requisitos de resistência em tal situação. Silva (2003, p.27) explica que o problema pode ser resolvido aumentando-se a seção do elemento de aço ou pela aplicação de material de proteção térmica.

Atualmente são encontradas alternativas de proteção térmica de estruturas de aço, as principais são:

- **Argamassa projetada "Cimentitious"**

Consiste de agregados e aglomerantes misturados com água, formando uma massa fluida, que é transportada por meio de uma mangueira até o esguicho, onde o ar comprimido faz o jateamento diretamente na superfície do aço. O resultado é uma superfície rugosa, mais apropriada para elementos acima de forros ou para ambientes menos exigentes. De acordo com Bellei (2008, p.216) as argamassas podem ser divididas em duas categorias:

a) Á base de vermiculita com cimento:

A vermiculita é um material esponjoso que quando misturado com cimento retém grande quantidade de água e caracteriza-se como um ótimo material de proteção passiva. As espessuras de aplicação variam de 10 à 50 mm. A densidade varia de 300 à 800 Kg/m³

Figura 13- Argamassa projetada

Fonte: Refrassol.com.br

b) À base de gesso com fibras minerais ou resinas:

Os materiais a base de gesso com fibras minerais ou resinas apresentam excelente desempenho para proteção passiva. As espessuras variam de 10 à 70 mm, densidade 300 Kg/m³.

Figura 14- Fibra projetada

Fonte: CBCA

- **Placas de lã de rocha**

São painéis de baixa densidade, rígidos ou flexíveis, feitos de materiais fibrosos, aglomerados pela adição de resinas termo-endurecíveis. A matéria-prima básica utilizada na confecção das placas é o basalto. São fixadas com pinos de aço soldados à estrutura metálica.

Figura 15- Placas de lã de rocha

Fonte: Gerdau

- **Mantas Cerâmicas**

Produtos formados a partir de fibras silico-aluminosas, presas à estrutura através da utilização de pinos de aço soldados na estrutura. Densidade de 65 à 128 Kg/cm³.

Figura 16- Manta cerâmica

Fonte: Gerdau

• Pintura intumescente

Constituída por polímeros com pigmentos intumescentes, que reagem na presença de fogo, o em geral a 200 °C, aumentando seu volume formando um filme isolante com espessura de até 40 vezes a sua espessura original aplicada. Os poros resultantes são preenchidos por gases atóxicos que, junto com resinas especiais que constituem as tintas, formam uma espuma rígida na superfície do aço, retardando o efeito do calor da chama. É aplicada por meios convencionais, pistola ou rolo, proporcionando textura e aparência e cores similares às pinturas convencionais. Espessura entre 55 á 2500 micrometros.

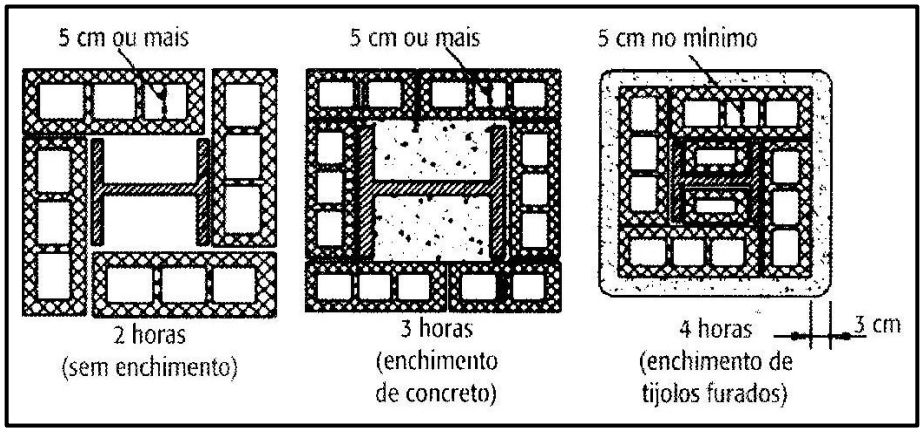
Figura 17- Pintura intumescente

Fonte: Engterm

•Alvenarias

Bellei (2008, p.217) cita que os tipos mais comuns de alvenaria utilizados para proteção térmica das estruturas de aço são tijolos de cerâmicos e bloco s de concreto celular. De maneira geral oferecem uma resistência ao fogo entre 2 a 4 horas.

Figura 18- Proteção por meio de alvenaria

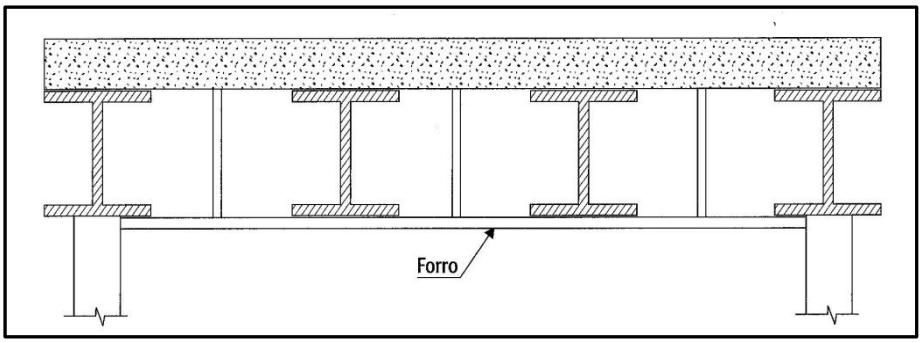


Fonte: Bellei (2008, p. 217)

•Forros suspensos de gesso

Segundo Bellei (2008, p.220) os forros suspensos mais comuns são os de gesso acartonado que dão em média proteção para 30 minutos, com espessuras de 14mm apoiados em uma grelha metálica. Densidade 68 à 96 Kg/m³.

Figura 19- Proteção com forro de gesso acartonado

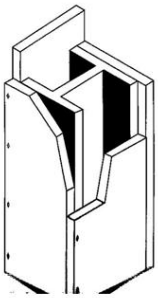


Fonte: Bellei (2008, p. 220)

•Placas de gesso acartonado

Silva (2003, p.138), explica que há placas de gesso acartonado específicas para proteção contra fogo de estruturas metálicas. Possuem custo superior as convencionais "dry-wall" e seu uso é restrito a ambientes internos

Figura 20- Proteção por meio de placas



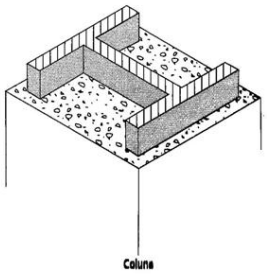
Fonte: Bellei (2008, p. 220)

•Concretos

Bellei(2008, p.220) cita o concreto como elemento de resistência ao fogo, para as estruturas de aço, porém deve ter uma espessura compatível sobre o mesmo para funcionar como protetor. Apresenta inconvenientes de alto peso específico além da difícil aplicação em

vigas. Cita ainda, o autor, que parâmetros de espessuras podem ser obtidos no anexo B da NBR-14323:1999.

Figura 21- Proteção com concreto



Fonte: Bellei (2008, p. 220)

2 METODOLOGIA

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa está classificada como do tipo exploratória, com procedimentos de pesquisa de fonte de papel, pois utilizou normas e literaturas técnicas referentes ao desempenho de métodos para o aumento de resistência ao fogo nas estruturas de aço, seja por aumento da seção de vigas e colunas de aço ou por aplicação de material de proteção térmica.

2.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O procedimento se deu pelo dimensionamento de um galpão industrial de uso geral, limitando-se até a concepção do pórtico principal, utilizando os moldes do manual de construção em aço publicado pelo Instituto Aço Brasil/CBCA e auxilio de software para análise de dimensionamento. Após foi simulada a utilização de uma carga de incêndio no interior da edificação que conduziu à necessidade de verificação da segurança estrutural em relação ao fogo, de acordo com a norma NBR-14432:2001. O desenvolvimento ocorreu da seguinte forma:

- definiu-se o modelo e dimensionou-se o pórtico principal;
- determinou-se o tempo necessário de resistência ao fogo dos elementos estruturais;
- dimensionou-se o pórtico na situação de incêndio e verificaram-se as alternativas de proteção ao fogo;
- traçou-se um comparativo entre os métodos de proteção e verificou-se os resultados da análise.

O fluxograma xx ilustra o roteiro das atividades realizadas.

Durante a execução do estudo foram utilizados os seguintes softwares e equipamentos:

Software Auto Cad 2010;

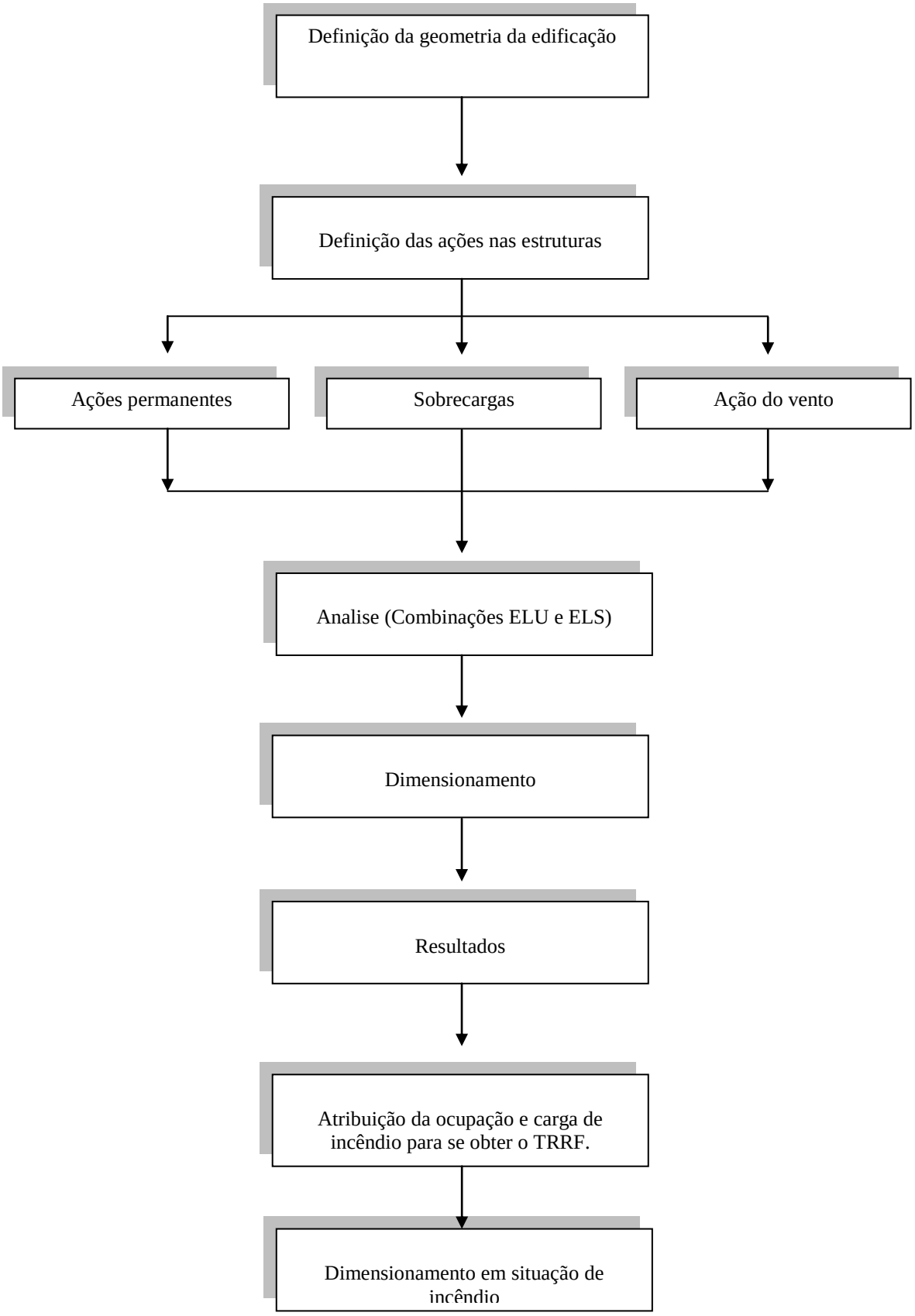
Software do pacote Office (Word, excell);

Software Matlab;

Software mCALC3D;

Notebook HP Pavilion dv5, com processador AMD Dual-core 2.1GHz.

Figura 22- Fluxograma das atividades



Fonte: Próprio autor

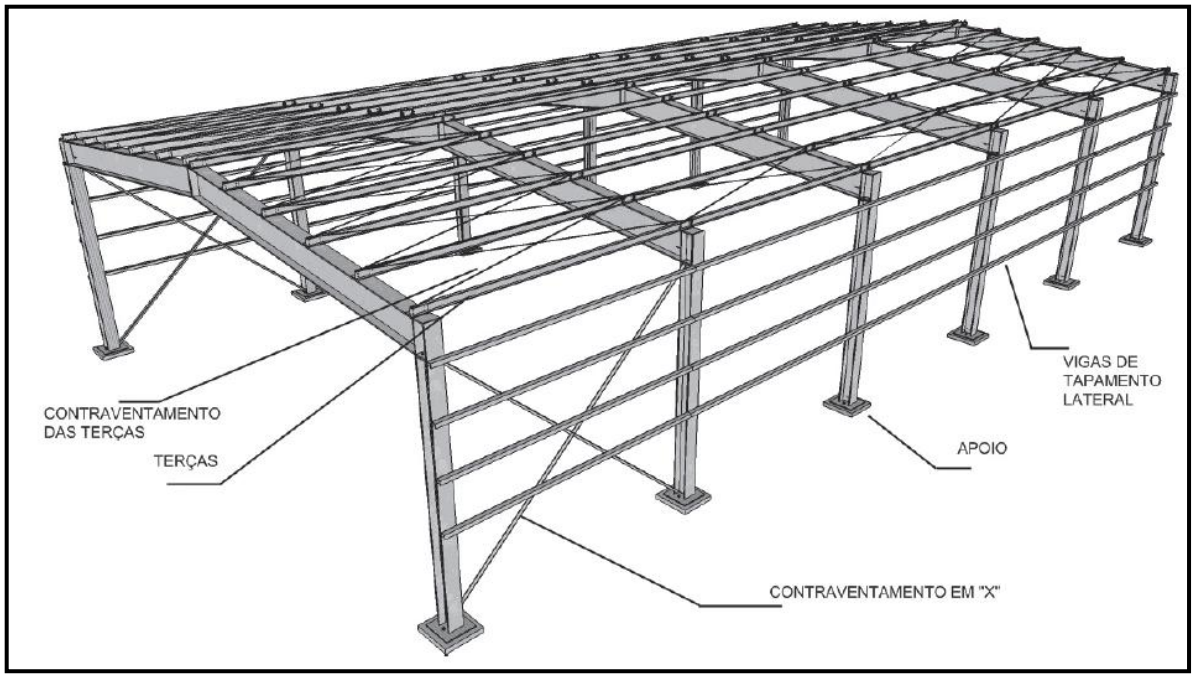
3 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 DEFINIÇÃO DO PÓRTICO PRINCIPAL

Definiu-se para a edificação em estudo um galpão com duas águas, inclinação da cobertura 10°, pórtico composto por perfis de alma cheia, bases com apoios simples rotulados, seção transversal de 15,00m, vão longitudinal de 6,00m entre pórticos, comprimento total de 54,00m,e pé-direito de 6,00m. Os perfis adotados foram do tipo laminado com fy=345 MPa e fu=450MPa, denominados comercialmente como perfis estruturais açominas em aço A572-GR50.

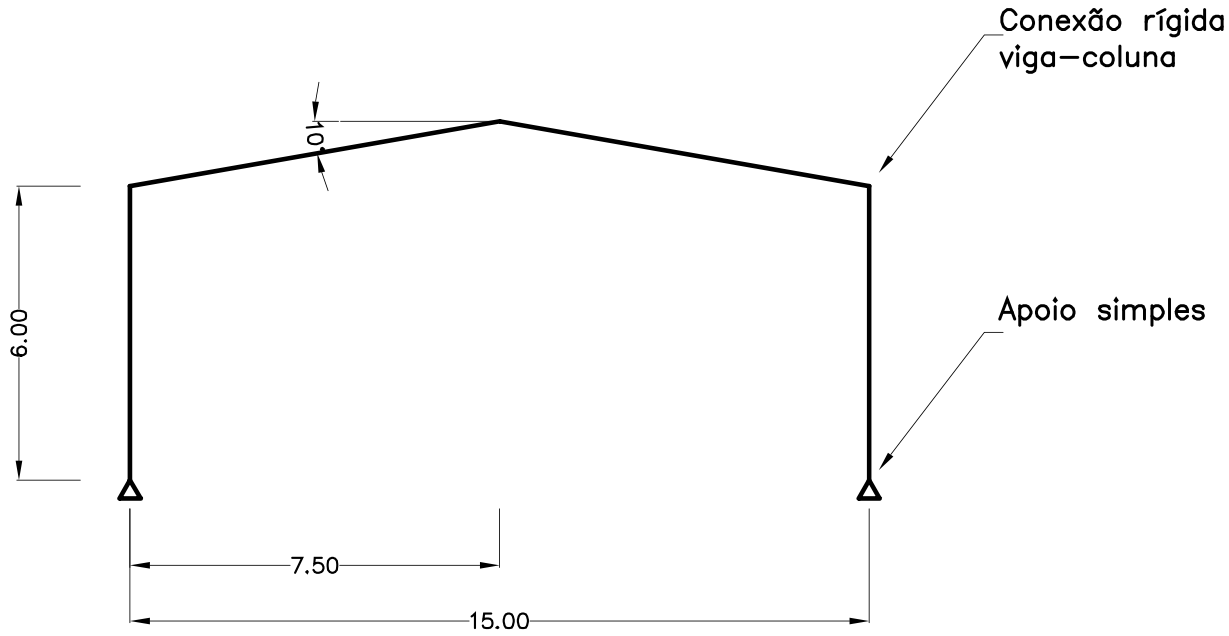
Nas figuras 23, 24 e 25 são apresentadas as formas da geometria básica do projeto.

Figura 23- Galpão industrial com pórticos de perfis em alma cheia



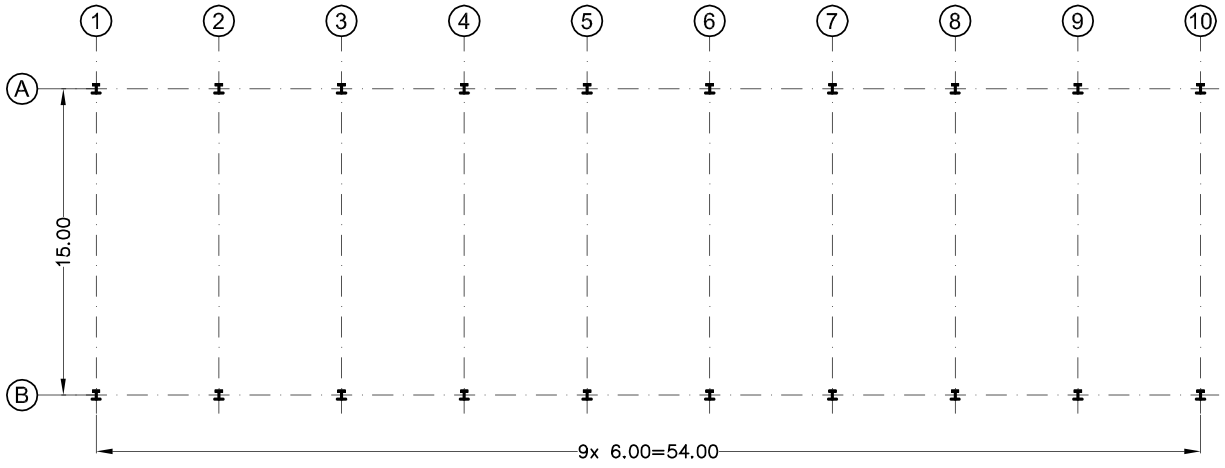
Fonte: Instituto Aço Brasil (2010, p.10)

Figura 24- Elevação transversal



Fonte: Próprio autor

Figura 25- Planta de eixos dos pilares



Fonte: Próprio autor

3.2 DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS

Lançando a geometria da edificação no software mcalc3D foi possível atribuir os carregamentos básicos das ações permanentes e acidentais, de acordo com a NBR-8800:2008, bem como determinar as ações devidas ao vento.

As ações adotadas foram as seguintes:

a) Permanentes

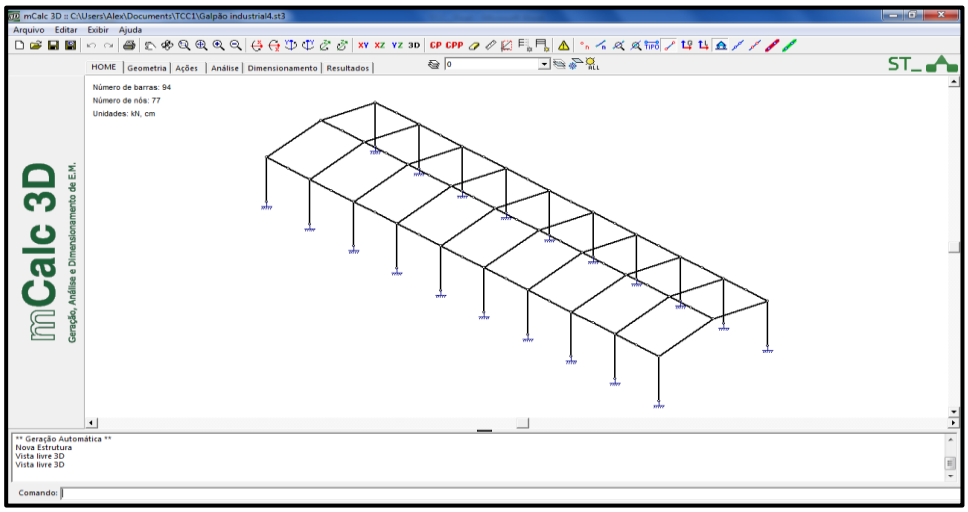
Telhas:	0,10 KN/m²
Contraventamentos:	0,05 KN/m²
Terças e Tirantes:	0,10 KN/m²
Vigas e colunas:	0,20 KN/m²
Total de ações permanentes:	0,45 KN/m²

b) Sobrecarga (ação acidental):

Segundo o anexo B da NBR:8800: 0,25 KN/m².

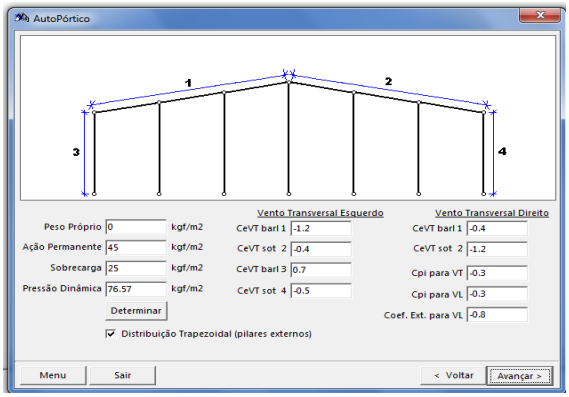
O mCalc3D é um software nacional de análise e dimensionamento de estruturas metálicas planas e espaciais, onde o dimensionamento é realizado de acordo com as normas brasileiras NBR-14762:2010, para perfis formados a frio, e NBR-8800:2008, para perfis laminados e soldados. A figura 26 mostra a interface gráfica do mCalc3D.

Figura 26- Interface gráfica do software mCalc3D



Fonte: Próprio autor

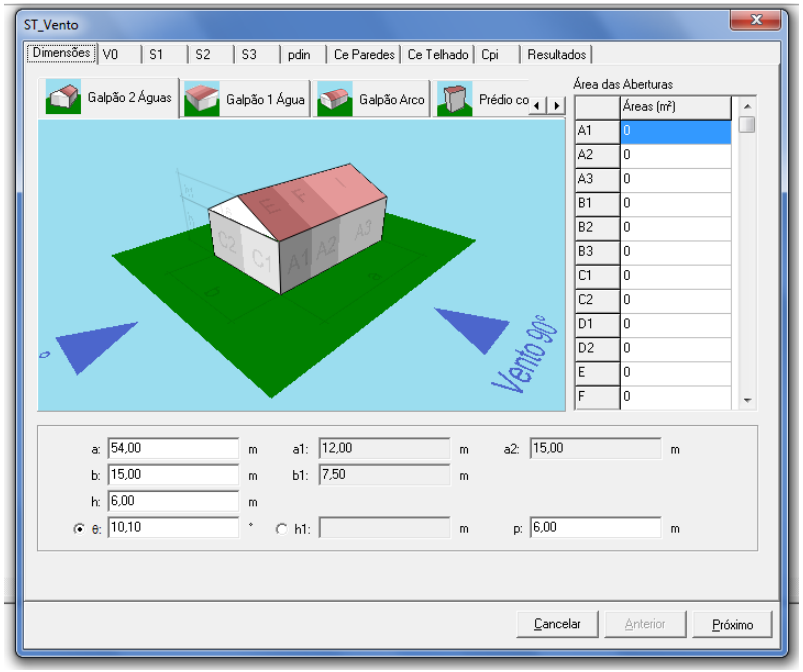
Figura 27- Lançamento de cargas no mCalc3D



Fonte: Próprio autor

O módulo ST_VENTO do software mCald3D, baseado nas dimensões da edificação bem como nas áreas de aberturas, calcula os coeficientes de pressão externos, internos, a pressão dinâmica do vento e distribui na estrutura conforme os procedimentos da NBR-6123:1988. A figura 28 ilustra a interface gráfica do ST_VENTO.

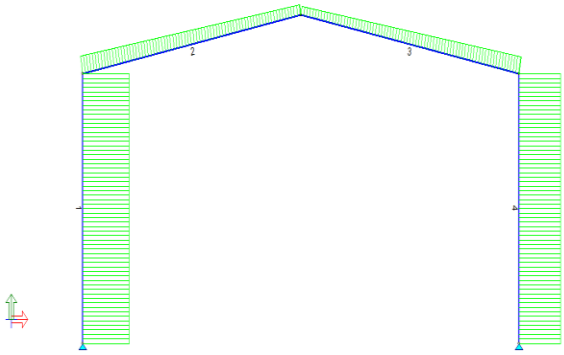
Figura 28- Interface gráfica ST_VENTO



Fonte: Próprio autor

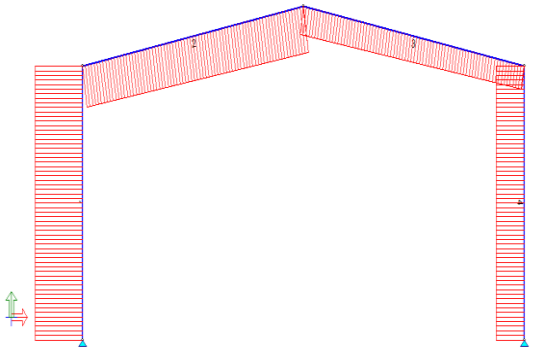
Os diagramas dos esforços e as deformações são apresentados na figuras 29 a 36.

Figura 30- Diagrama de esforço normal (ELU), comb. 1



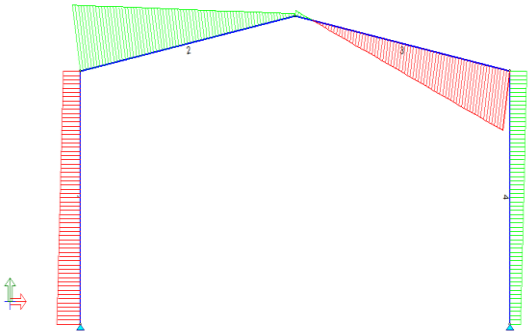
Fonte: Próprio autor

Figura 29- Diagrama de esforço normal (ELU), comb. 2



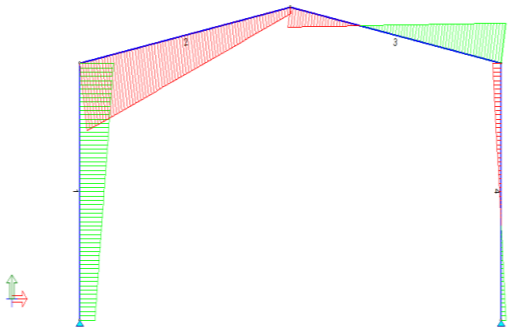
Fonte: Próprio autor

Figura 31- Diagrama de esforço cortante (ELU), comb. 1



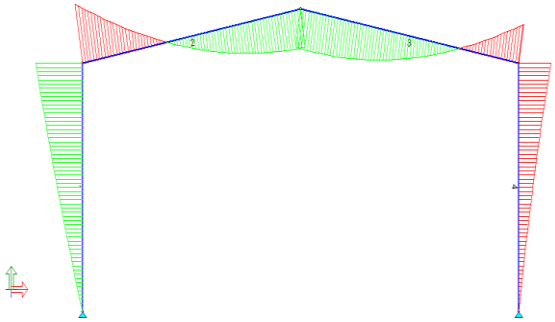
Fonte: Próprio autor

Figura 32- Diagrama de esforço cortante (ELU). comb. 2



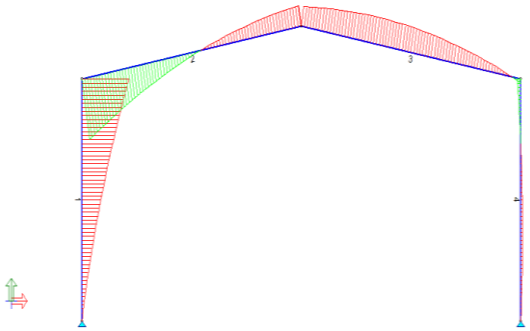
Fonte: Próprio autor

Figura 34- Diagrama de momentos (ELU), comb. 1



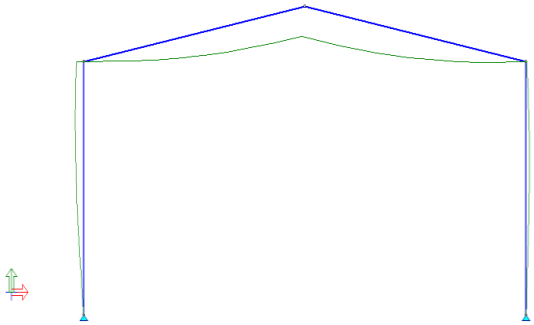
Fonte: Próprio autor

Figura 33- Diagrama de momentos (ELU), comb. 2



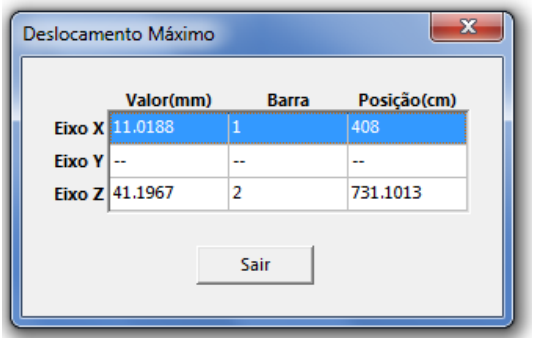
Fonte: Próprio autor

Figura 36- Geometria deformada (ELS), Comb. 3



Fonte: Próprio autor

Figura 35- Deslocamentos máximos (ELS), Comb. 3

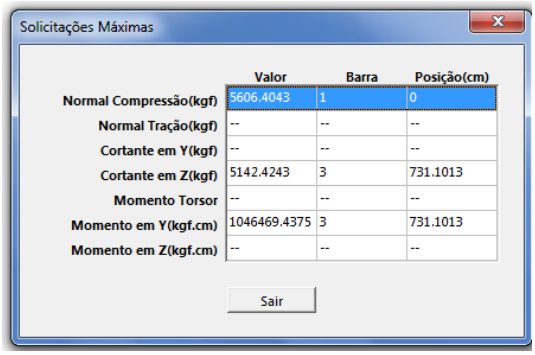


Fonte: Próprio autor

Fonte: Autor

Os valores numéricos dos esforços e deformações são apresentados nas figuras 37 a 39.

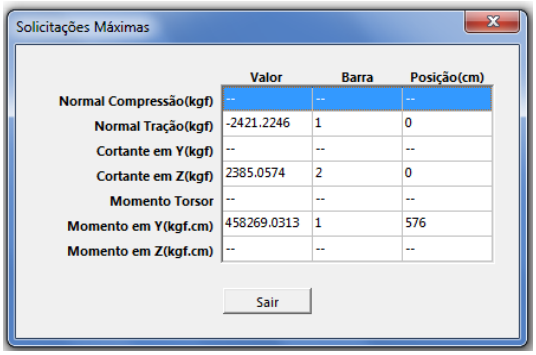
Figura 37- Solicitações (ELU), Comb. 1



	Valor	Barra	Posição(cm)
Normal Compressão(kgf)	5606.4043	1	0
Normal Tração(kgf)	--	--	--
Cortante em Y(kgf)	--	--	--
Cortante em Z(kgf)	5142.4243	3	731.1013
Momento Torsor	--	--	--
Momento em Y(kgf.cm)	1046469.4375	3	731.1013
Momento em Z(kgf.cm)	--	--	--

Fonte: Próprio autor

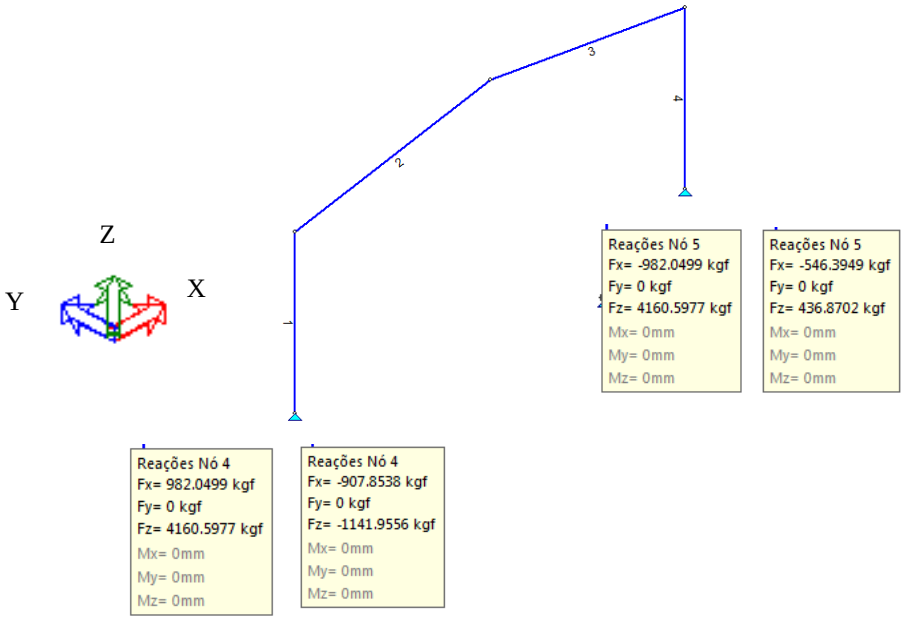
Figura 38- Solicitações (ELU), Comb. 2



	Valor	Barra	Posição(cm)
Normal Compressão(kgf)	--	--	--
Normal Tração(kgf)	-2421.2246	1	0
Cortante em Y(kgf)	--	--	--
Cortante em Z(kgf)	2385.0574	2	0
Momento Torsor	--	--	--
Momento em Y(kgf.cm)	458269.0313	1	576
Momento em Z(kgf.cm)	--	--	--

Fonte: Próprio autor

Figura 39- Reações nos apoios

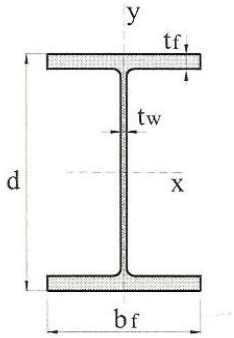


Fonte: Próprio autor

3.3 DETERMINAÇÃO DOS PERFIS ADOTADOS NO PÓRTICO

O dimensionamento e escolha dos perfis foi possível através do módulo “dimensionamento” no software mCalc3D. Para o caso em estudo a composição do pórtico foi constituída por perfis I laminados (figura 40) designados de acordo com o quadro 5.

Figura 40- Perfil "i" laminado de abas paralelas



Fonte: Souza (2011, p.13)

Quadro 5- Dimensões e propriedades geométricas dos perfis escolhidos

Elemento estrutural	Bitola mmxKg/m	massa linear	área	Alt	Alma		abas		Perímetro	fator de massividade
		m	A	d	t_w	h	tf	bf	u	u/A
		Kg/m	cm2	mm	mm	mm	mm	mm	m	m^{-1}
Vigas	W 310x44,5	44,5	57,2	313	6,6	291	11,2	166	1,26	220
Pilares	W 310x44,5	44,5	57,2	313	6,6	291	11,2	166	1,26	220

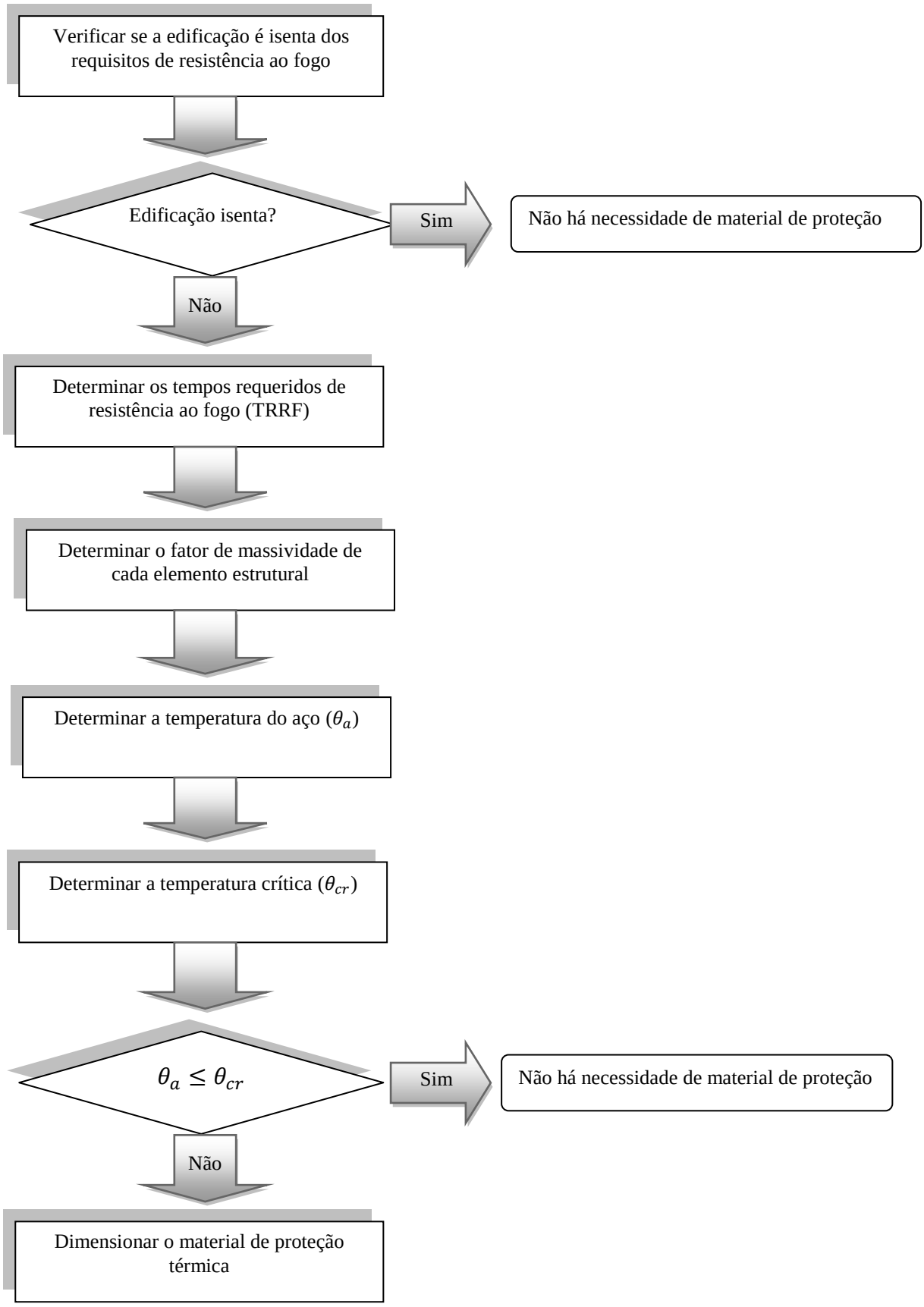
Fonte: Adaptado de Bellei (2008, p.415)

3.4 DIMENSIONAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Para verificar a segurança estrutural, em situação de incêndio foi necessário conhecer a exigência de resistência ao fogo para a edificação, ou seja, o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), tendo em vista evitar o colapso da estrutura em tempo inferior aquele necessário à fuga dos usuários e/ou aproximação e ingresso de pessoas e equipamentos para combate ao fogo.

A NBR-14323:99 apresenta o método de dimensionamento simplificado, o qual foi ilustrado sob forma de fluxograma apresentado na figura 41.

Figura 41- Fluxograma de dimensionamento da estrutura de aço em situação de incêndios pelo método simplificado



Fonte: Adaptado de Silva (2001, p.155)

3.4.1 Verificação da isenção de requisitos de resistência ao fogo

Conforme visto em 2.5.7 o TRRF está vinculado a ocupação, área de pavimento e altura da edificação. Os tempos são encontrados na tabela A1 da NBR-14432:2001.

Para o estudo foi simulada uma ocupação industrial de materiais sintéticos ou plásticos com carga específica de incêndio de 2.000 MJ/m².

Consultando as isenções de requisitos de resistência ao fogo da NBR-14432:2001 se observa que a edificação não seria isenta de resistência ao fogo.

Quadro 6- Isenções segundo a NBR-14432:99

ISENÇÕES SEGUNDO A NBR 14432				
Ocupação	Área, m^2	Densidade de Carga de Incêndio (MJ/m^2)	Altura	Equipamentos de Proteção de Incêndio[a]
Qualquer	⩽ 750	Qualquer	Qualquer	Mínimo
Qualquer	⩽ 1500	⩽ 1000	⩽ 2 pavimentos	Mínimo
Estádios, aeroportos, estações ferroviárias	Qualquer	Qualquer	⩽ 23 m	Mínimo
Estacionamento aberto[b]	Qualquer	Qualquer	⩽ 30 m	Mínimo
Lojas[c]	Qualquer	Incombustível	< 30 m	Mínimo
Qualquer	Qualquer	⩽ 500	Térrea	Mínimo
Industrial[c]	Qualquer	⩽ 1200	Térrea	Mínimo
Lojas[c]	Qualquer	⩽ 2000	Térrea	Mínimo
Qualquer	Qualquer	Qualquer	Térrea	Chuveiros[d]
Qualquer	⩽ 5000	Qualquer	Térrea	Duas fachadas para acesso dos bombeiros[e]

[a] Mínimo por lei
[b] Estruturas de concreto ou aço mas com vigas compostas e fatores de forma mínimos de 250 m^{-1} para colunas e 350 m^{-1} para vigas
[c] Compartimentação em conformidade com outras Normas Brasileiras
[d] Em conformidade com outras Normas Brasileiras
[e] Perímetro das fachadas[3] 50% do perímetro da edificação

Fonte: Pannoni (2007, p. 82)

3.4.2 Determinação do tempo requerido de resistência ao fogo, TRRF

Consultando a tabela C.1 da NBR-14432:2001 se obteve na ocupação industrial, a divisão ‘I-2” e carga específica de incêndio de 2.000 MJ/m².

A determinação do tempo exigido de resistência ao fogo das estruturas foi realizada pelo método tabular da NBR-14432:2001. A referida norma admite o uso do método do

tempo equivalente, porém este último não será abordado, mas as informações podem ser obtidas em Vargas (2003, p.19).

Consultando a tabela A.1 da NBR-13432:2001 e combinando-se a linha ocupação com a coluna altura foi encontrado TRRF=60 min. cujo tempo se trata da estrutura (pilares vigas e lajes) deve resistir à exposição ao incêndio padrão.

Figura 42- Ilustração da tabela A.1 NBR-14432:2001

Tabela A.1 – Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), em minuto

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S_2 $h_s > 10$ m	Classe S_1 $h_s \leq 10$ m	Classe P_1 $h \leq 6$ m	Classe P_2 $6 m < h \leq 12$ m	Classe P_3 $12 m < h \leq 23$ m	Classe P_4 $23 m < h \leq 30$ m	Classe P_5 $h > 30$ m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Fonte: NBR-14432 (2001, p. 7)

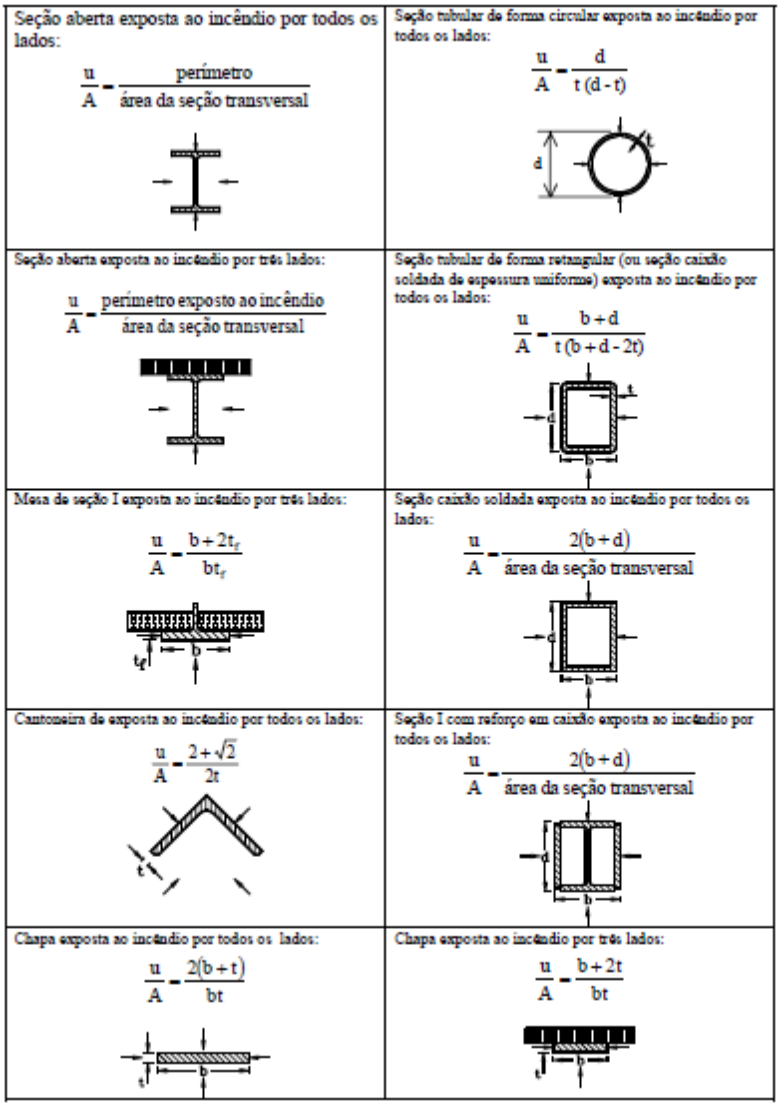
3.4.3 Determinação do fator de massividade (ou fator de forma)

De acordo com Pannoni (2007, p. 78), um dos fatores que contribuem para a resistência ao fogo é a veloc[1]idade de aquecimento do componente, que governa o tempo transcorrido para atingir a temperatura de colapso (ou temperatura crítica). A velocidade de aquecimento é função das dimensões da seção. Uma seção de baixa esbeltez, de grande massa, se aquecerá mais lentamente do que uma seção esbelta.

A NBR-14432:99 define fator de massividade como a razão entre o perímetro exposto ao incêndio e a área da seção transversal de um perfil estrutural. Observa-se que o fator de massividade pode tomar diferentes valores para um mesmo perfil. A figura 43 ilustra as considerações para determinação do fator de massividade para algumas situações.

[1] Os tempos entre parênteses, na figura 42, aplicam-se apenas a subsolos com área < 500 m² e demais edificações com área < 750 m² (NBR-14432, anexo A letra ‘b”).

Figura 43- Fator de massividade para alguns elementos estruturais sem proteção



Fonte: NBR-14323:99, tabela 6

Para os perfis em estudo foi computado o perfil mais crítico (usados nas vigas) e considerada seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados, tanto para os pilares como para as vigas de cobertura. Assim pode-se encontrar o valor através das informações do catálogo do fabricante. Logo:

$$\text{Fator de massividade} = \frac{u}{A} = \frac{1{,}26\ m}{5{,}72.10^{-3} m^2} \cong 220\ \text{m}^{-1}$$

Onde:
u – é o perímetro exposto ao incêndio, em m
A – é a área da seção transversal do perfil, em m²

3.4.4 Determinação da temperatura do aço dos elementos estruturais

Tendo em mãos o TRRF para a estrutura calculou-se a temperatura máxima para as estruturas de aço (θ_a) expostas ao incêndio padrão. O cálculo foi realizado de acordo com a equação dada na NBR-14323:99 e com o auxilio do Matlab, onde, foi gerado o algoritmo para realização das rodadas de cálculo com o s incrementos de tempo "Δt".

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\left({}^{u}/_{A}\right)}{C_a \cdot \rho_a}\,\varphi\Delta t$$

Onde:

${}^{u}/_{A}$ - é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem proteção contra incêndio, em um por metro;

ρ_a - é a massa específica do aço em Kg/m³;

C_a – é o calor específico do aço em joule por Kg por grau Celcius;

φ - é o valor do fluxo de calor por unidade de área em watt por metro quadrado;

Δt – é o intervalo de tempo, em segundos;

$$\Delta t \text{ deve ser} \leq \begin{cases} \dfrac{25\,000}{(u/A)} \\ 5 \text{ s} \end{cases}$$

A progressão da temperatura nos elementos estruturais de aço para diferentes tempos está apresentada no quadro 6.

Quadro 7 - Temperatura do aço exposto ao incêndio padrão

		FATOR DE MASSIVIDADE (m^{-1})				
Tempo		220				
(min)	(s)	Temp. gases °C	Temp. aço °C	φ_r	φ_c	ΔΘ °C
0	0	20	20	0	0	0,00
10	600	678	520,8	12186	4035	3,79
30	1800	842	831,7	1699	274	0,46
60	3600	945	941,53	821	101	0,21

Fonte: Próprio autor

Observa-se que o perfil selecionado atinge 941°C após 60 minutos, submetido ao incêndio padrão.

3.4.5 Determinação da temperatura crítica dos elementos estruturais

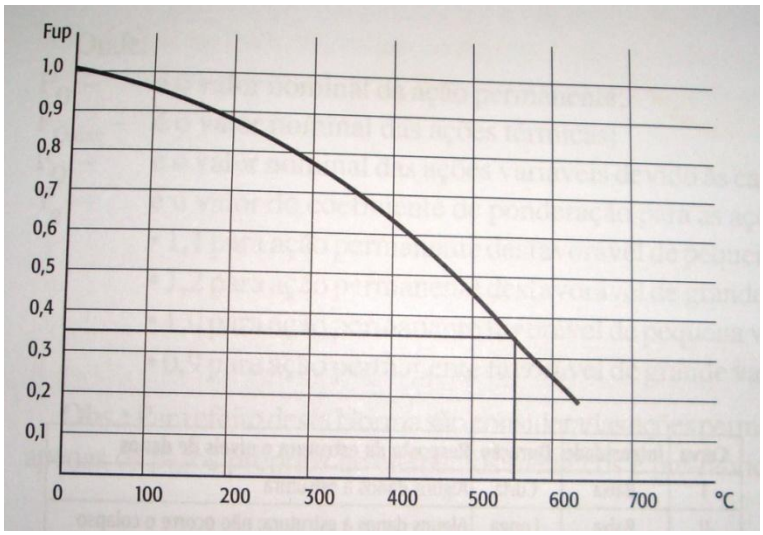
De acordo com Vargas (2003, p.29), a temperatura de colapso de elementos estruturais é denominada temperatura crítica.

Bellei (2008, p.201) afirma que os aços carbono ASTM A36, A572 e outros, têm sua resistência reduzida em 50% (representada pelo fator de redução 0,63 conforme tabela 1 da NBR-14323:99) à partir da temperatura limite média de 550 °C e que a relação tensão de trabalho/tensão de ruptura varia de acordo com a temperatura.

O gráfico da variação das tensões e temperaturas é equacionado por:

$$Fup = \frac{Tensão\ de\ trabalho}{Tensão\ crítica\ de\ ruptura} = \frac{0{,}6\ f_y}{f_u}$$

Figura 44- Variação de Fup em função da temperatura crítica



Fonte: Bellei (2008, p.201)

Tal referência também é encontrada na Instrução Técnica n° 08/2011 (Resistência ao fogo dos elementos estruturais) do Corpo de Bombeiros de São Paulo em seu item 5.5.1 que recomenda que a temperatura crítica do aço seja tomada como um valor máximo de 550ºC para os aços convencionais.

Observa-se que de acordo com o quadro 7, a temperatura limite estabelecida de 550°C, é atingida após cerca de 11 minutos, e que para alcançar a resistência de 60 minutos preconizada pela norma e, indicada na figura 40, deve-se usar uma proteção adicional para o perfil ou redimensionar o mesmo para que tenha uma fator de massividade menor.

De acordo com o fluxograma de dimensionamento pode-se concluir que: $\theta_a \leq \theta_{cr}$ e que os perfil necessitam de proteção passiva ao fogo.

3.4.6 Dimensionamento do material de proteção

Dentre as alternativas de material de proteção térmica foram analisados os seguintes materiais:

a) pintura intumescente;
b) placas de gesso acartonado;
c) argamassa projetada;
d) manta cerâmica.

De acordo com a NBR-14323:99 (8.5.2.1, p.14) a elevação de temperatura de um elemento estrutural envolvido por material de proteção contra incêndio pode ser determinada por cálculos ou por ensaios. Dessa forma é possível calcular qual a espessura adequada do material de proteção.

Com a utilização dos resultados de ensaios reais de resistência ao fogo, fornecidos pelo fabricante, na forma de uma carta de cobertura, as espessuras de proteção podem ser determinadas.

A forma analítica, com base em dados dos materiais como densidade, condutividade térmica e calor específico é, de modo geral, mais precisa. Esta metodologia é acurada, porém possui limitações, sobretudo quando os materiais sofrem mudanças físicas durante o incêndio, como é o caso de tintas intumescentes ou alguns materiais projetados que possuem fluídos cristalizados em sua composição.

Vargas (2003, p. 44) esclarece que os ensaios realizados no Brasil, para caracterizar os materiais de proteção térmica de estruturas de aço, têm por base a NBR 5628 “Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo”, os princípios da ASTM E-119 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials e da norma Loss Prevention Standard LPS1107.

No Brasil, os serviços de ensaio de materiais de proteção contra incêndio são prestados pelo instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o qual utiliza um forno que possui

um sistema de aquecimento constituído por queimadores de baixa pressão e sistema de exaustão por dutos. Utilizam-se amostras de perfis, com fatores de massividade diferentes e espessuras do material de proteção térmica diferentes para cada amostra. O aquecimento do forno segue as temperaturas conforme a curva-padrão da NBR 5628 e são registradas as temperaturas médias nas superfícies dos perfis de aço com material de proteção térmica.

Os resultados obtidos nos ensaios são analisados e então é elaborado um perfil térmico do material, denominado na literatura técnica de: Carta de cobertura. Nessa carta, para cada fator de massividade do perfil e o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) para o elemento estrutural, é indicada a espessura do material de proteção térmica, considerando uma temperatura preestabelecida.

Maiores detalhes do ensaio podem ser obtidas em Vargas (2003, p.44) e no site do IPT (www.ipt.br).

A NBR-14323:99 apresenta em seu item 8.5.1.2.2 a equação para determinação da elevação da temperatura em um elemento estrutural envolvido por material de proteção térmica dada por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m\left({}^{u}/_{A}\right)}{t_m.\,C_a.\,\rho_a}\,\frac{\left(\theta_{g,t} - \theta_{a,t}\right)}{1 + \xi/3}\Delta\mathrm{t} - \left(\mathrm{e}^{\xi/10} - 1\right)\Delta\theta_{g,t}$$

Com

$$\xi = \frac{C_m\rho_m}{C_a\rho_a}\,t_m\left(\frac{U_m}{A}\right)$$

Onde:

${}^{U_m}/_{A}$ - é o fator de massividade para elementos estruturais envolvidos por material de proteção contra incêndio, em um por metro;

U_m- é o perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio (perímetro da face interna do material de proteção contra incêndio, limitado às dimensões do elemento estrutural de aço), em metro;

A- É a área da seção transversal do elemento estrutural, em metro quadrado;

C_a – é o calor específico do aço em joule por Kg por grau Celcius;

C_m – é o calor específico do material de proteção contra incêndio, em joule por Kg por grau Celcius;

t_m – é a espessura do material de proteção contra incêndio,em metro;

$\theta_{a,t}$ – é a temperatura do aço no tempo t, em grau Celcius;

$\theta_{g,t}$ – é a temperatura dos gases no tempo t, em grau Celcius;

λ_m – é a condutividade térmica do material de proteção contra incêndio, em watt por metro e por grau Celsius;

ρ_a - é a massa específica do aço em Kg/m³;

ρ_m - é a massa específica do material de proteção contra incêndio, em Kg/m³;

Δt – é o intervalo de tempo, em segundos.

$$\Delta t \text{ deve ser} \leq \begin{cases} \dfrac{25\,000}{(U_m/A)} \\ 30 \text{ s} \end{cases}$$

a) Pintura intumescente

Consultando-se a carta de cobertura para pintura intumescente, tendo como referência o produto AUDAX-Renitherm PMA600 se obteve a quantidade de material necessária para o TRRF desejado.

Figura 45- Carta de cobertura pintura intumescente

Renitherm® PMA 600

Table 2

Four Sided Protection to I-Section Columns and Beams at 550°C							
30 minutes		60 minutes				90 minutes	
Section factor m⁻¹	DFT mm	Section factor m⁻¹	DFT mm	Section factor m⁻¹	DFT mm	Section factor m⁻¹	DFT mm
225	0.205	55	0.200	190	0.549	40	0.230
230	0.212	60	0.212	195	0.562	45	0.262
235	0.218	65	0.225	200	0.575	50	0.295
240	0.225	67	0.230	205	0.593	55	0.327
244	0.230	70	0.238	210	0.614	60	0.360
250	0.238	75	0.251	215	0.635	65	0.392
255	0.244	80	0.264	220	0.656	70	0.424
260	0.251	85	0.277	225	0.678	75	0.457
265	0.257	90	0.290	230	0.699	80	0.489
270	0.264	95	0.303	235	0.720	85	0.522
275	0.270	100	0.316	240	0.779	90	0.554
280	0.277	105	0.329	245	0.838	95	0.592
285	0.283	110	0.341	250	0.897	100	0.652
290	0.290	115	0.354	255	0.956	105	0.713
295	0.296	120	0.367	260	1.015	110	0.773
300	0.303	125	0.380	265	1.063	115	0.833
305	0.309	130	0.393	270	1.094	120	0.893
310	0.316	135	0.406	275	1.125	125	0.954
315	0.322	140	0.419	280	1.156	130	1.014
320	0.329	145	0.432	285	1.188	135	1.074
		150	0.445	290	1.219	140	1.134
		155	0.458	295	1.250	145	1.195
		160	0.471	300	1.281	150	1.255
		165	0.484	305	1.313	155	1.315
		170	0.497	310	1.344	160	1.375
		175	0.510	315	1.375	165	1.436
		180	0.523	320	1.406		
		185	0.536				

Fonte: Catálogo AUDAX

O quadro 8 indica a análise de custos para a alternativa “a” de proteção contra incêndio para as estruturas.

Quadro 8- Custo para proteção com pintura intumescente

Material	área (m²)	espessura (mm)	densidade (g/cm³)	custo unitário (R$/Kg)	Σ R$
Pintura Intumescente	34,3098	0,656	1,35	33	1002,70

Fonte: Próprio autor

b) Placas de gesso acartonado

Consultando-se a carta de cobertura para placas de gesso acartonado RF, se obteve a espessura de material necessária para o TRRF desejado.

Figura 46- Carta de cobertura para placas de gesso acartonado

u/A (m^{-1})	TRRF (minutos)			
	30	60	90	120
< 55	12,5	12.5	12.5	15
55	12,5	12,5	12,5	2 x 12,5
70	12,5	12,5	12,5	2 x 12,5
98	12,5	12,5	15	2 x 12,5
138	12,5	12,5	2 x 12,5	2 x 12,5
152	12,5	12,5	2 x 12,5	2 x 15
203	12,5	15	2 x 12,5	2 x 15
240	12,5	15	2 x 12,5	3 x 12,5
334	12,5	2 x 12,5	3 x 12,5	3 x 12,5
400	12,5	2 x 12,5	3 x 12,5	3 x 12,5

Fonte: Vargas (2003, p.45)

O quadro 9 indica a análise de custos para a alternativa “b” de proteção das estruturas.

Quadro 9- Custo para proteção com gesso acartonado

Material	área (m²)	espessura (mm)	espessura comercial da chapa (mm)	n° de chapas sobrepostas	custo unitário (R$/Kg)	Σ R$
Placas de gesso acartonado	26,08634	15	12,5	2	18,72	976,67

Fonte: Próprio autor

c) Argamassa projetada

Para o estudo foi adotada a argamassa projetada Cafco Blaze Shield II, fabricados pela Isolatek International e aplicadas no Brasil pela PCF Soluções de São Paulo/SP. Consultando-se a carta de cobertura, se obteve a espessura de material necessária para o TRRF desejado.

Figura 47- Carta de cobertura da argamassa projetada

Hp/A up to	Dry thickness in mm to provide fire resistance (mins) of					
	30	**60**	**90**	**120**	**180**	**240**
30	10	12	12	12	17	25
50	10	12	12	16	26	36
70	10	12	15	21	34	46
90	10	12	17	25	40	55
110	10	12	20	29	46	64
130	10	13	22	32	51	70
150	10	14	24	35	56	
170	10	15	26	37	60	
190	10	16	28	40	64	
210	10	16	29	42	67	
230	10	17	30	43	70	
250	10	18	31	45		
270	10	18	33	47		
290	10	19	34	48		
310	10	19	35	50		
Linear interpolation is permissable between values of Hp/A						

Fonte: Catalogo Isolatek International, Clafco Blaze Shield II

De acordo com o fabricante, realizando-se a interpolação linear é possível obter a espessura para o perfil desejado.

O peso específico informado do produto é 240 Kg/m³. O quadro 10 mostra a análise de custo para a alternativa.

Quadro 10- Custo para proteção com argamassa projetada

Material	área (m²)	espessura (mm)	densidade (Kg/m³)	custo unitário (R$/Kg)	Σ R$
Argamassa projetada	34,3098	16,5	240	5,2	706,51

Fonte: Próprio autor

d) Manta cerâmica

As mantas flexíveis, de acordo com Vargas (2003, p.45) são formadas por um aglomerado de fibras sílico-aluminosas, com densidade na ordem de 64 kg/m³ e são aplicadas de modo a envolver a estrutura, fixadas com pinos de aço já soldados na estrutura.

Para o estudo foi adotada a carta de cobertura da manta cerâmica Fiberfrax – Carborundum, para de obter a espessura de material necessária para o TRRF desejado.

Figura 48- Carta de cobertura da manta cerâmica

u/A (m^{-1})	TRRF (minutos)			
	30	60	90	120
150	12	19	38	50
200	12	19	38	63
300	12	19	50	75

Fonte: Vargas (2003, p.45)

O quadro 11 mostra a análise de custo para a alternativa.

Quadro 11- Custo para proteção com manta cerâmica

Material	área (m²)	espessura (mm)	densidade (Kg/m³)	custo unitário (m³)	Σ R$
Manta cerâmica	34,3098	19	64	905,51	590,29

Fonte: Próprio autor

3.4.7 Dimensionamento da estrutura para situação de incêndio

Dentre as alternativas de proteção passiva, Bellei (2008, p.200) coloca que, pode-se dimensionar a estrutura para resistir à temperatura elevada. Tal alternativa foi realizada com o objetivo de obter o incremento, em massa de aço, em relação ao dimensionamento à temperatura ambiente.

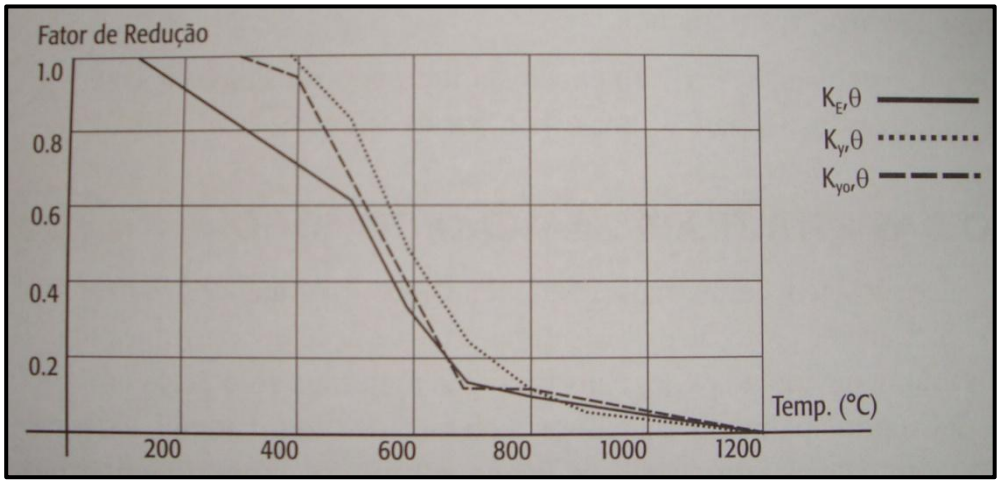
Para o estudo foi adotada a temperatura crítica e utilizada a NBR-14323 que fornece os fatores de redução das propriedades físicas do aço em situação de incêndio. As figuras 49 e 50 indicam de forma numérica e gráfica, respectivamente, tais reduções.

Figura 49 - Fatores de redução para o aço

Temperatura do aço θ_a **(°C)**	**Fator de redução para o limite de escoamento dos aços laminados a quente** $K_{y,\theta}$	**Fator de redução para o limite de escoamento dos aços trefilados** $K_{y0,\theta}$	**Fator de redução para o módulos de elasticidade de todos os tipos de aço** K_E, θ
20	1,000	1,000	1,0000
100	1,000	1,000	1,0000
200	1,000	1,000	0,9000
300	1,000	1,000	0,8000
400	1,000	0,940	0,7000
500	0,780	0,670	0,6000
600	0,470	0,400	0,3100
700	0,230	0,120	0,1300
800	0,110	0,110	0,0900
900	0,060	0,080	0,0675
1000	0,040	0,050	0,0450
1100	0,020	0,030	0,0225
1200	0,000	0,000	0,0000

Fonte: NBR-14323 (tabela 1, p.5)

Figura 50- Variação dos fatores de redução para o limite de escoamento e o módulo de elasticidade do aço com a temperatura



Fonte: Bellei (2008, p.200)

Realizando-se a interpolação linear se obteve os seguintes fatores:

$K_{y,\theta}$ (550 °C) = 0,625

$K_{E,\theta}$ (550 °C) = 0,4550

• Combinações para ELU em situação de incêndio

Conforme visto em 2.5.7.1 as combinações de ações para os estados limites últimos em situação de incêndio foram consideradas como combinações últimas em locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, nem elevadas concentrações de pessoas. Para a situação configurada, segundo a NBR-14323, item 6.2, as combinações de ações podem ser expressas por:

$$\sum_{i=1}^{n} \gamma_{gi} F_{Gi} + F_{Q,exc} + 0{,}2 F_Q$$

Onde:

F_{Gi} - é o valor nominal da ação permanente.

$F_{Q,exc}$ - é o valor nominal das ações térmicas.

F_Q - é o valor nominal das ações variáveis devidas as cargas acidentais.

γ_g - é o valor do coeficiente de ponderação para ações permanentes igual a:

1,1 para ação permanente desfavorável de pequena variabilidade;

1,2 para ação permanente desfavorável de grande variabilidade;

1,0 para ação permanente favorável de pequena variabilidade;

0,9 para ação permanente favorável de grande variabilidade.

Silva (2001, p.80) esclarece que o efeito das ações térmicas é levando em conta por meio dos coeficientes de redução $K_{y,\theta}$ e $K_{E,\theta}$ e, em certos casos, pelas restrições impostas ás deformações térmicas, porém esta última pode ser desprezada quando se utiliza o modelo de incêndio padrão.

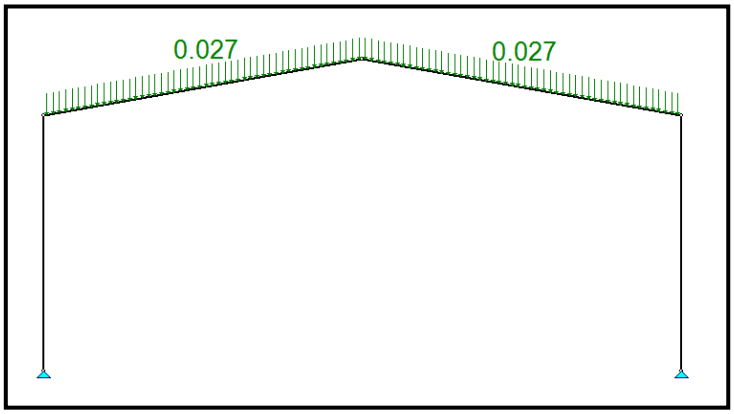
Desta forma se determinou o valor de cálculo da ação conforme segue:

G1(Peso próprio): 0,45KN/m²

Q (Sobrecarga): 0,25 KN/m²

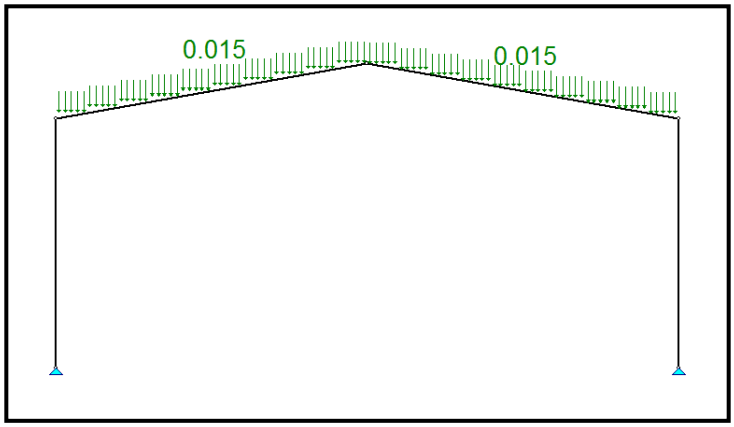
$$P = 1{,}1.0{,}45 + 0{,}2.0{,}25$$
$$P = 0.545\ KN/m^2$$

Figura 51- Valores da ação permanente (KN/cm)



Fonte: Próprio autor

Figura 52- Ação variável (KN/cm)



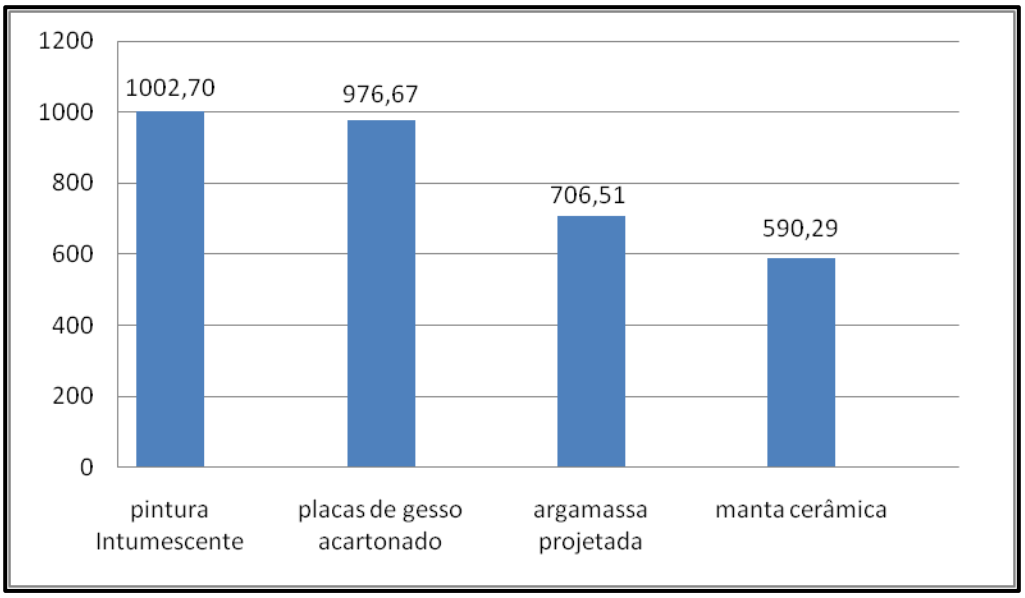
Fonte: Próprio autor

Realizando o dimensionamento no Software mCald3D, o resultados encontrados dos esforços extrapolaram as capacidades resistentes dos perfis comercialmente encontrados, tanto os laminados como os perfis soldados.

3.5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

É possível, mediante informações apresentadas para proteção de um pórtico, traçar um comparativo entre as alternativas de proteção passiva contra incêndio, como visto na figura 53, de forma a auxiliar em eventual tomada de decisão sobre qual sistema deve ser adotado.

Figura 53- Gráfico comparativo de custos (R$) para diferentes alternativas de proteção passiva em estruturas de aço



Fonte: Próprio autor

O quadro 12 apresenta a síntese dos demais condicionantes entre as diversas alternativas de proteção passiva nas estruturas de aço, os quais são importantes para subsidiar na escolha do método de proteção a ser utilizado.

Quadro 12- Comparativo entre diferentes sistemas de proteção passiva em estruturas de aço

Material	Vantagens	Desvantagens
Manta de fibra cerâmica	• ideais para edificações em funcionamento; • fornecidos prontos para instalação; • aplicação limpa, sem controle de espessura na obra.	• necessitam de pinos de ancoragem para fixação; • possuem baixa resistência mecânica; •acabamento rústico.
Tintas intumescentes	• boas opções (comercialmente, devido ao preço do material), principalmente até 60 minutos de proteção; • excelente acabamento visual; • podem permanecer expostos, tendo excelente resistência mecânica.	• necessidade de mão de obra muito especializada. • requerem controle rigoroso de espessura (300μm a 6mm), • condições climáticas e prazos entre as demãos e acabamento.
Placas rígidas	• acabamento similar às placas de gesso acartonado; • permitem acabamento e pintura; • boa resistência mecânica; • ideais para colunas aparentes, com tempo de proteção entre 90 e 120 minutos.	• custo elevado; •aplicação lenta; •requer elementos de ancoragem e limpeza posterior à aplicação; •externamente sofre agressão da umidade. •aumenta da carga estrutural;
Argamassa projetada	• ideais para áreas industriais e equipamentos, com testes para petroquímica; • podem permanecer expostos e suportam intemperismos.	•acabamento grosseiro. •aplicação lenta •requer limpeza posterior à aplicação; •baixa resistência mecânica a impactos.

Fonte: Próprio autor

CONCLUSÕES

O estudo propiciou a oportunidade de realizar análise e obter conhecimento no que se refere a proteção passiva das estruturas metálicas, principalmente quanto as normas e legislação vigentes.

Propiciou o contato com atividades de dimensionamento de estruturas metálicas com o auxílio de software e entendimento da importância da integração dos projetos estruturais com os de proteção ao incêndio.

O presente estudo contribuiu para comprovar a inviabilidade técnica e econômica da alternativa de substituição dos perfis, para propiciar proteção passiva ao fogo, através do re-dimensionamento da estrutura de aço em situação de incêndio.

Observa-se que a necessidade de proteção passiva ao fogo em estruturas de aço não está diretamente relacionada às dimensões da edificação, mas sim, a combinação de vários fatores agravantes ou atenuantes, dentre eles o uso, ocupação e altura.

Por meio dos resultados de pesquisas de mercado e manuais técnicos foi possível elaborar o quadro número 13 que resume e apresenta as análises em relação ao consumo de materiais, custos e equivalência em quilogramas de aço que cada alternativa representa para proteção passiva ao fogo.

Quadro 13- Análise de consumo e custos para diferentes alternativas de proteção passiva

Proteção passiva ao fogo		N° de pórticos	Área de proteção (m²/m)		Comprimento do pórtico (m)	Área do pórtico (m²)	Área total (m²)	Custo por pórtico (R$)	Equivalência em Kg de aço	Proporção ao pórtico (%)
a	pintura Intumescente	10	viga	1,260	15,23	19,190	191,898	1002,70	224,32	18,35%
			pilar	1,260	12,00	15,120	151,200			
b	placas de gesso acartonado	10	viga	0,958	15,23	14,590	145,903	976,67	218,49	17,87%
			pilar	0,958	12,00	11,496	114,960			
c	argamassa projetada	10	viga	1,260	15,23	19,190	191,898	706,51	158,06	12,93%
			pilar	1,260	12,00	15,120	151,200			
d	manta cerâmica	10	viga	1,260	15,23	19,190	191,898	590,29	132,06	10,80%
			pilar	1,260	12,00	15,120	151,200			

Fonte: Próprio autor

Percebe-se que as alternativas de aplicação de pintura intumescente e a de utilização de placas de gesso acartonado se situam num similar patamar de custos e que a argamassa

projetada e a manta cerâmica situam-se em outro inferior e também possuem valores similares.

Percebeu-se, ainda, que torna-se importante analisar fatores como necessidade de requinte no acabamento das edificações, se as estruturas são expostas ou ocultas, necessidade de resistência a impactos edificações, exposição a intempéries os quais devem ser levados em conta para a correta escolha do material de proteção passiva das estruturas de aço e não apenas.

Com relação as condições de obtenção de tais insumos para realização de proteção passiva, todos possuem boa disponibilidade comercial em centros maiores e, não apresentam maiores dificuldades para realização da logística para os locais de utilização.

A partir dos resultados obtidos é possível sugerir para trabalhos futuros sobre este tema, que seja realizada a determinação do tempo exigido de resistência ao fogo das estruturas, através do método do tempo equivalente, comentado no item 4.4.2 deste trabalho, o qual é função da carga de incêndio, das características térmicas dos elementos de vedação e da ventilação do compartimento.

Sugere-se ainda como trabalho importante, realizar uma abordagem em estruturas de concreto armado, que são de uso corrente no país e são contempladas na nova versão da NBR-14323, que encontra-se em fase de consulta pública.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – procedimento: Rio de Janeiro, 1999. 46 p.

_____. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimento: Rio de Janeiro, 2001. 14 p.

_____. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo: Rio de Janeiro, 2001. 12 p.

_____. **NBR 8681**: Ações de segurança nas estruturas - Procedimento: Rio de Janeiro, 2004. 18 p.

_____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios: Rio de Janeiro, 2008. 237 p.

BELLEI, Ildoni H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Fernando O. **Edifícios de múltiplos andares em aço.** São Paulo: Pini, 2008. 556p., il.

BELLEI, Ildoni H. **Edifícios industriais em aço:** Projeto e cálculo. 6ª ed. São Paulo: Pini, 2010. 591p., il.

CAMILO JUNIOR, Abel Batista. **Manual de prevenção e combate a incêndios**. 7ª ed. São Paulo: Senac, 2006. 197p., il.

FREIRE, Escritório Técnico Carlos. **Histórico da estrutura metálica**. Disponível em <http://metalica.com.br/historico-da-estrutura-metalica>. Acesso em 17 jun 2012.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Manual de construção em aço**: Prevenção contra incêndio no projeto de arquitetura. Rio de Janeiro, 2010. 72p.; il.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Manual de construção em aço**: Galpões para usos gerais. 4.ed. Rio de Janeiro, 2010. 74p.; il.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Manual de construção em aço**: Resistência ao fogo das estruturas de aço. Rio de Janeiro, 2003. 76p.; il.

SANTOS, Vladmir Alves dos; PANNONI, Fabio Domingos. Pintura Intumescente de estruturas metálicas. **Téchne**, São Paulo, ano 20, n.181, p. 86-88, abr.2012.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Zigurate, 2001. 249p., il.

SOUZA, Alexander Clemente de. **Dimensionamento de elementos estruturais em aço**. São Carlos: EduFSCar, 2011. 108p, il.

SPOHR, Valdi Henrique. **Estruturas de aço:** figura 6 – Ensaio de tração. 2011. 100 f. Notas de aula.

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RS. **Trabalhos acadêmicos**: apresentação, referências e citações. Ijuí: Ed. Unijui, 2011. 36p.; il.

ANEXOS

Anexo “A”

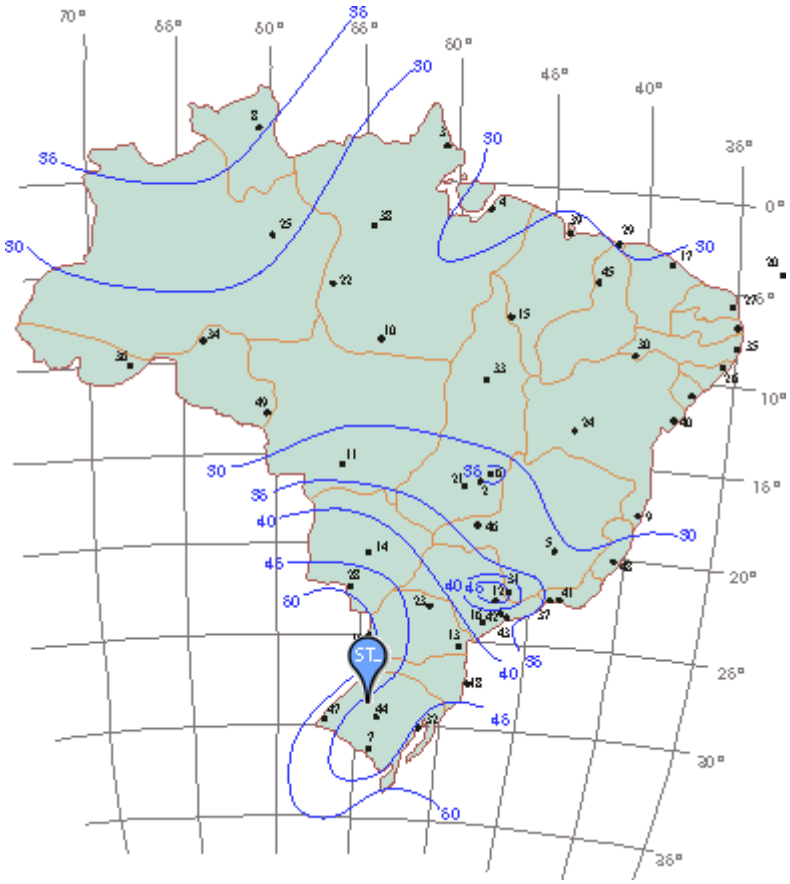
Relatório de determinação da ação do vento realizando no software mCalc3D.

3. AÇÃO DO VENTO NA EDIFICAÇÃO

Conforme NBR 6123:1988

3.1. DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DINÂMICA DO VENTO

3.1.1. Velocidade básica do vento



Vo = 45 m/s

3.1.2. Fator topográfico S1

S_1 = 1,00 Terreno plano ou fracamente acidentado

3.1.3. Fator que relaciona rugosidade, dimensões da edificação e altura sobre o terreno S2

Rugosidade do terreno: categoria IV
Dimensões da edificação: classe C

Z = 7,34 m Altura acima do terreno

S_2 =
0,77

3.1.4. Fator estatístico S3

Edificação Grupo 3

S_3 =
0,95

3.1.5. Pressão dinâmica

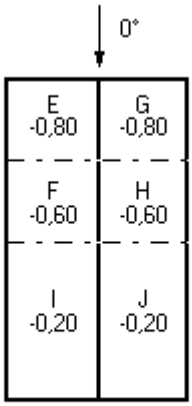
Vo = 45 m/s Velocidade básica do vento

$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$ =
32,72 m/s Velocidade característica do vento

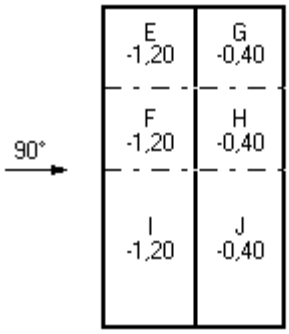
$q = 0{,}613 \cdot V_k^2$ =
66,91 kgf/m²

3.2. COEFICIENTES DE FORMA EXTERNO PARA TELHADOS COM DUAS ÁGUAS EM EDIFICAÇÕES DE PLANTA RETANGULAR

Vento a 0º



Vento a 90º

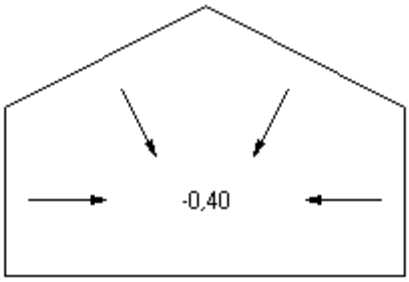


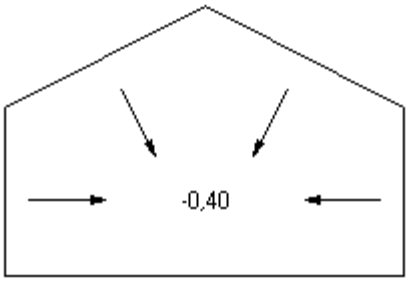
3.3. COEFICIENTES DE PRESSÃO INTERNA

Abertura dominante em uma face paralela ao vento

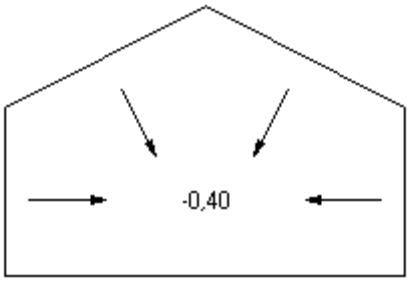
Abertura dominante situada em zona de alta sucção externa: Cpi = -0,40 ou Cpi = -0,40

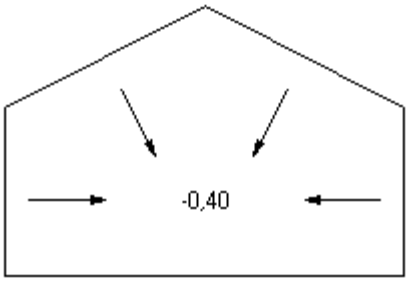
Vento a 0º





Vento a 90º





Anexo “B”

Relatório de dimensionamento do pórtico realizando no software mCalc3D.

mCalc 3D / DIMENSIONAMENTO

Cliente: Unijui
Obra: Galpão Industrial
Trabalho: TCC
Responsável: Alex Copetti Lima
Data: 22/11/2012
Hora: 22:25:03

1. DIMENSIONAMENTO

Unidades: kgf-cm

Barra		Normal	Cortante Z	Momento Y	Eq. Int. Max.	Comp.	Dimensionamento
1	Sol. Res. Sd/Rd	5606.4043 179400 0.03	2182.51 38874.6016 0.06	-1046469.3125 1807820.375 -0.58	0.6539	600	W 310 44.5
2	Sol. Res. Sd/Rd	3122.5938 179400 0.02	5142.4238 38874.6016 0.13	-1046469.25 2303984.75 -0.45	0.5215	761.5638	W 310 44.5
3	Sol. Res. Sd/Rd	3122.5938 179400 0.02	5142.4238 38874.6016 0.13	-1046469.4375 2303984.75 -0.45	0.5215	761.5638	W 310 44.5
4	Sol. Res. Sd/Rd	5606.4043 179400 0.03	2182.51 38874.6016 0.06	-1046469.25 1807820.375 -0.58	0.6539	600	W 310 44.5

2. QUADRO DE QUANTITATIVOS

Unidades: kgf-cm

Grupo	Perfil	Aço	L total	Peso(kgf)
1	W 310 44.5	ASTM A572 GR50	2723.1277	1222.7388

Peso Total: 1222.7388 kgf

Anexo “C”

Algoritmo gerado no Matlab.

```
clear all;
clc;
%% Informar variáveis
t_rrf=120;
teta_a(1,1)=20;
teta_z=teta_a(1,1);  %temperatura ambiente
teta_cr=550;
t(1,1)=0;
f_mas=220;      %fator de massividade
c_a=600;        %calor especifico
p_a=7850;       %Peso especifico do aço
lm=0.14;        %condutividade térmica
tm=0.015;       %espessura do material
cm=1500;        %calor especifico do material
pm=900;         %peso especifico
f_mas_m=150;    %fator de massividade do material
ce=2.7183;
%%
i=2;    %contador de iteração
x_dt=25000/(60*f_mas);  %Cálculo Delta t
y_dt=(5/60);
if x_dt < y_dt
    delta_t=x_dt;
else
    delta_t=y_dt;
end
%%instante zero
    teta_g(1,1)=teta_z+345*log10(8*t(1,1)+1);
    fi_r(1,1)=5.67e-8*0.5*(((teta_g(1,1)+273)^4)-((teta_a(1,1)+273)^4));   %fi de radiação
    fi_c(1,1)=25*(teta_g(1,1)-teta_a(1,1));
    teta_a(i,1)=teta_a(i-1,1);
    iter(i-1,1)=1;
while t(i-1,1) <= t_rrf %teta_a(i-1,1) < teta_cr %analisa o tempo t(i,1) <= t_rrf
    iter(i,1)=iter(i-1,1)+1;
    t(i,1)=t(i-1,1)+delta_t;
    teta_g(i,1)=teta_z+345*log10(8*t(i,1)+1);
    teta_ai(i,1)=teta_a(i-1,1);
    fi_r(i,1)=5.67e-8*0.5*(((teta_g(i,1)+273)^4)-((teta_a(i-1,1)+273)^4));   %fi de radiação
    fi_c(i,1)=25*(teta_g(i,1)-teta_a(i-1,1));
    fi(i,1)=fi_r(i,1)+fi_c(i,1);
    teta_a(i,1)=teta_ai(i,1)+(f_mas/(c_a*p_a))*fi(i,1)*delta_t*60;
    delta_teta(i,1)=teta_a(i,1)-teta_ai(i,1);
    i=i+1;

end
fprintf('Calculo tempo\n');
fprintf('Instante t=%f\n',t);
fprintf('temperatura do aço=%f\n',teta_a);
fprintf('temperatura dos gases=%f\n',teta_g);
fprintf('Fi_r==%f\n',fi_r);
fprintf('Fi_c==%f\n',fi_c);
fprintf('Delta_teta==%f\n',delta_teta);

xlswrite('...\Alex\Resultados.xlsx', t, 'Plan1', 'B3');
xlswrite('...\Alex\Resultados.xlsx', teta_g, 'Plan1', 'C3');
xlswrite('...\Alex\Resultados.xlsx', teta_a, 'Plan1', 'D3');
xlswrite('...\Alex\Resultados.xlsx', fi_r, 'Plan1', 'E3');
xlswrite('...\Alex\Resultados.xlsx', fi_c, 'Plan1', 'F3');
xlswrite('...\Alex\Resultados.xlsx', delta_teta, 'Plan1', 'G3');
xlswrite('...\Alex\Resultados.xlsx', delta_teta, 'Plan1', 'G3');
xlswrite('...\Alex\Resultados.xlsx', iter, 'Plan1', 'A3');
```