

DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA EM ELEMENTOS  
ESTRUTURAIS EXTERNOS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE  
INCÊNDIO

EVELYN TAIT

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - ESCOLA DE ENGENHARIA

BELO HORIZONTE, 06 DE SETEMBRO DE 2001

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA EM ELEMENTOS  
ESTRUTURAIS EXTERNOS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE  
INCÊNDIO

**Evelyn Tait**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

**Prof.Dr.Ricardo Hallal Fakury**  
DEES/UFMG (Orientador)

**Prof.Dr.Valdir Pignatta e Silva**  
DEF/EPUSP

**Prof.Dr.Francisco Carlos Rodrigues**  
DEES/UFMG

Belo Horizonte, 06 de setembro de 2001

Dedico este trabalho ao meu pai William, à minha mãe Anna Lúcia, aos meus irmãos Glen, Clive e Brian e à minha avó Stella.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela conquista de mais uma realização.

Ao professor Ricardo Hallal Fakury, pela atenção constante durante todo o curso de mestrado e pela intensa orientação durante a elaboração desta dissertação.

À USIMINAS, pela concessão da bolsa de mestrado, possibilitando, assim, o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, por todo o apoio, incentivo e compreensão prestados e pela paciência durante as horas mais árduas.

Ao meu pai, pela assistência na tradução de textos em língua inglesa e ao meu irmão Clive, por ter traduzido os textos em alemão.

Aos meus amigos e colegas, pelo estímulo e pela ajuda.

Aos professores e funcionários do Departamento de Estruturas, que tornaram esta jornada mais agradável.

## RESUMO

O comportamento das estruturas de aço em situação de incêndio, e sua proteção, apenas recentemente têm merecido atenção por parte de autoridades públicas e pesquisadores no Brasil. Entretanto, a atual norma brasileira sobre o assunto, a NBR 14323, editada em julho de 1999, não apresenta um procedimento específico a ser seguido para a obtenção da temperatura em elementos estruturais de aço situados no exterior de um edifício em situação de incêndio. Este presente trabalho tomou como referência, principalmente, um texto de Margaret Law, intitulado "Fire safety of external building elements - the design approach", editado em 1978, a pré norma europeia Eurocode 3 Part 1-2, de 1995 e também o guia de projeto para estruturas de aço em situação de incêndio do American Iron and Steel Institute - AISI editado em 1979. Teve-se como objetivo a determinação da temperatura mencionada, incluindo as características do compartimento incendiado, da chama e do incêndio, sendo que esses dois últimos têm seus comportamentos diferenciados devido à presença de ventilação natural ou forçada no compartimento. Incluem-se, ainda, os mecanismos de transferência de calor envolvidos no processo e o método de determinação dos fatores de configuração dos elementos de aço. Foi também desenvolvida uma metodologia, com o seu respectivo fluxograma, para a determinação da elevação da temperatura do elemento externo de aço. Ao final, são apresentados alguns exemplos, os quais foram elaborados com os objetivos de ilustrar a metodologia apresentada.

## **ABSTRACT**

The behaviour of steel structures under fire conditions, and its protection, has only recently deserved attention on the public authorities and researcher's part in Brazil. However, the actual Brazilian code NBR 14323, about the issue, published in 1999, does not present a specific procedure to be followed for the temperature reached in structural steel elements on the exterior of a building under fire conditions. This actual work has as references mainly a paper of Margaret Law, Fire safety of external building elements - the design approach issued in 1978, Part 1-2 of Eurocode 3, published by CEN as a European Prestandard (ENV) in 1995 and a design guide for fire-safe structural steel published by the American Iron and Steel Institute in 1979. The objectives of this work are to determine the mentioned temperature, including the characteristics of the fire compartment, the fire and flame with the last two having their different behaviour due to the presence of no forced draught or forced draught in the compartment. Also included are the heat transfer mechanisms involved in the process and the method of determining the configuration factor for the steel elements. Also developed was a methodology, with its respective fluxogram to determine the increased temperature of the external steel element. Finally some examples are presented, which were elaborated aiming to illustrate the methodology presented.

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 <u>GENERALIDADES</u> .....	1
1.2 <u>TRABALHOS PRODUZIDOS</u> .....	3
1.3 <u>SOBRE O PRESENTE TRABALHO</u> .....	16
<b>2 COMPORTAMENTO DAS ESTRUTURAS EXTERNAS DE AÇO EM INCÊNDIO</b> .....	17
2.1 <u>GENERALIDADES</u> .....	17
2.1.1 BASES .....	17
2.1.2 AÇÕES TÉRMICAS PARA PEÇAS EXTERNAS- MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO .....	18
2.1.2.1 Temperatura dos Gases em Incêndio .....	18
2.1.2.2 Dimensões do Compartimento e Carga de Incêndio .....	20
2.1.2.3 Efeitos do Vento .....	23
2.1.2.3.1 <i>Modo de Ventilação</i> .....	23
2.1.2.3.2 <i>Deflexão da Chama pelo                     Vento</i> .....	24
2.1.2.4 Características do Incêndio e da Chama .....	26
2.1.2.4.1 <i>Estudos Experimentais da                     Projeção Externa da Chama</i> ...	26
2.1.2.4.2 <i>Perfil da Temperatura na                     Fachada de um Edifício</i> .....	28
2.1.2.4.3 <i>Ventilação Natural</i> .....	35
2.1.2.4.3.1 <i>Taxa de queima</i> ..	35

2.1.2.4.3.2	Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento .....	38
2.1.2.4.3.3	Altura da Chama ..	41
2.1.2.4.3.4	Largura e Profundidade da Chama .....	47
2.1.2.4.3.5	Projeção Horizontal da Chama .....	48
2.1.2.4.3.6	Comprimento da Chama ao longo do Seu Eixo ..	51
2.1.2.4.3.7	Temperatura da Chama na Janela .....	51
2.1.2.4.3.8	Emissividade na Janela .....	52
2.1.2.4.3.9	Distribuição . da Temperatura ao longo do Eixo da Chama .....	55
2.1.2.4.3.10	Emissividade da Chama .....	56
2.1.2.4.4	Ventilação Forçada .....	57
2.1.2.4.4.1	Taxa de Queima ...	58
2.1.2.4.4.2	Temperatura de Incêndio dentro do Compartimento . .....	58
2.1.2.4.4.3	Velocidade do Vento .....	58
2.1.2.4.4.4	Altura da Chama ..	60
2.1.2.4.4.5	Projeção Horizontal da Chama .....	63
2.1.2.4.4.6	Largura da Chama ..	64
2.1.2.4.4.7	Comprimento da Chama ao Longo do Seu Eixo ..	65



2.1.2.4.4.8	<i>Temperatura da Chama na Janela</i>	67
2.1.2.4.4.9	<i>Emissividade na Janela</i>	68
2.1.2.4.4.10	<i>Temperatura da Chama ao longo do Seu Eixo</i>	68
2.1.2.4.4.11	<i>Emissividade da Chama</i>	70
2.1.2.4.4.12	<i>Efeito da Sacada ou Toldo em uma Chama</i>	71
2.1.3	DIMENSÕES E FACES DAS PEÇAS	72
2.1.4	DISTÂNCIA DE SEGURANÇA DA PAREDE AO PILAR	73
2.1.4.1	Pilares em Frente às Janelas em Apenas uma Parede do Compartimento	74
2.1.4.2	Pilares em Frente às Janelas em Duas Paredes do Compartimento	76
2.1.5	MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR À SUPERFÍCIE DO AÇO EXTERNO	80
2.1.5.1	Equilíbrio Térmico	96
2.1.5.1.1	<i>Convecção das Chamas e Gases Quentes</i>	103
2.1.5.1.1.1	<i>Ventilação Natural</i>	104
2.1.5.1.1.2	<i>Ventilação Forçada</i>	105
2.1.5.1.2	<i>Radiação das Chamas</i>	106
2.1.6	FATORES DE CONFIGURAÇÃO	110
2.1.6.1	Fator de Configuração Total	110
2.1.6.2	Fator de Configuração	112

2.1.6.2.1	<i>Fator de Configuração, Segundo o Eurocode 3 Part 1-2 (2) .....</i>	112
2.1.6.2.2	<i>Fator de Configuração, Segundo o AISI (4) .....</i>	117
2.1.6.2.2.1	<i>Pilar em Frente à Janela, para Todas as Condições de Ventilação .....</i>	117
2.1.6.2.2.1.1	<i>Chama como Superfície Irradiante ...</i>	117
2.1.6.2.2.1.2	<i>Janela como Superfície Irradiante ...</i>	123
2.1.6.2.2.2	<i>Pilar ao lado da Janela sob Condições de Ventilação Natural ...</i>	126
2.1.6.2.2.2.1	<i>Chama como Superfície Irradiante ...</i>	126
2.1.6.2.2.2.2	<i>Janela como Superfície Irradiante ...</i>	131
2.1.6.2.2.3	<i>Pilar ao lado da Janela sob Condições de Ventilação Forçada ..</i>	134
2.1.6.2.2.3.1	<i>Chama como Superfície Irradiante .....</i>	134
2.1.6.2.2.3.2	<i>Janela como Superfície Irradiante .....</i>	136

2.1.7 ANTEPAROS .....	138
2.1.8 VIGAS DE BORDO .....	139
2.1.8.1 Vigas de Bordo com Mesas Protegidas .....	139
2.1.8.2 Vigas de Bordo com Anteparo ..	140
2.2 <u>TEMPERATURAS MEDIDAS NAS PEÇAS EXTERNAS</u> ....	142
2.2.1 PILARES NÃO ENVOLVIDOS EM CHAMAS ....	142
2.2.1.1 Transferência de Calor por Radiação .....	142
2.2.1.2 Emissividade das Chamas .....	145
2.2.1.3 Temperatura da Chama .....	148
2.2.1.4 Absortividade da Chama .....	151
2.2.2 VIGAS NÃO ENVOLVIDAS EM CHAMAS .....	151
2.2.2.1 Transferência de Calor por Radiação .....	151
2.2.2.2 Emissividade da Chama .....	153
2.2.2.3 Temperatura da Chama .....	154
2.2.2.4 Absortividade da Chama .....	156
2.2.3 PILARES ENVOLVIDOS EM CHAMAS .....	157
2.2.3.1 Transferência de Calor por Radiação .....	157
2.2.3.2 Emissividade da Chama .....	158
2.2.3.3 Temperatura da Chama .....	160
2.2.3.4 Absortividade da Chama .....	164
2.2.4 VIGAS TOTALMENTE OU PARCIALMENTE ENVOLVIDAS EM CHAMAS .....	164
2.2.4.1 Transferência de Calor por Radiação .....	164
2.2.4.1.1 <i>Geral</i> .....	164
2.2.4.1.2 <i>Condição de Ventilação</i> <i>Natural</i> .....	167
2.2.4.1.3 <i>Condição de Ventilação</i> <i>Forçada</i> .....	169

2.2.4.2	Emissividade da Chama .....	171
2.2.4.3	Absortividade da Chama .....	171
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS EXTERNOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....</b>	<b>172</b>
3.1	<u>INTRODUÇÃO</u> .....	172
3.2	<u>DIMENSÕES DO COMPARTIMENTO DE INCÊNDIO</u> .....	172
3.2.1	COMPARTIMENTO SIMPLES DE INCÊNDIO ...	172
3.2.2	COMPARTIMENTO COM MAIS QUE UMA JANELA ..	173
3.2.3	COMPARTIMENTO COM JANELAS EM MAIS QUE UMA PAREDE .....	173
3.2.4	COMPARTIMENTO COM UM NÚCLEO .....	174
3.3	<u>CARACTERÍSTICAS DO INCÊNDIO E DA CHAMA</u> .....	174
3.3.1	VENTILAÇÃO NATURAL .....	174
3.3.1.1	Taxa de Queima .....	174
3.3.1.2	Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento .....	175
3.3.1.3	Altura da Chama .....	176
3.3.1.4	Largura da Chama .....	176
3.3.1.5	Profundidade da Chama .....	177
3.3.1.6	Projeção Horizontal da Chama ..	177
3.3.1.7	Comprimento da Chama ao longo do Eixo .....	178
3.3.1.8	Temperatura da Chama na Janela .....	178
3.3.1.9	Emissividade na Janela .....	178
3.3.1.10	Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo .....	179
3.3.1.11	Emissividade da Chama .....	179

3.3.2	VENTILAÇÃO FORÇADA .....	180
3.3.2.1	Taxa de Queima .....	180
3.3.2.2	Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento .....	181
3.3.2.3	Altura da Chama .....	181
3.3.2.4	Projeção Horizontal da Chama ..	181
3.3.2.5	Largura da Chama .....	182
3.3.2.6	Comprimento da Chama ao longo do Eixo .....	182
3.3.2.7	Temperatura da Chama na Janela .....	182
3.3.2.8	Emissividade na Janela .....	183
3.3.2.9	Temperatura da Chama ao longo do Eixo .....	183
3.3.2.9.1	<i>Pilares não Envolvidos em Chamas</i> .....	183
3.3.2.9.2	<i>Vigas não Envolvidas em Chamas</i> .....	184
3.3.2.9.3	<i>Pilares Envolvidos em Chamas</i> .....	184
3.3.2.9.4	<i>Vigas Totalmente ou Parcialmente Envolvidas em Chamas</i> .....	185
3.3.2.10	Emissividade da Chama .....	185
3.4	<u>EQUILÍBRIO TÉRMICO</u> .....	186
3.4.1	PEÇAS NÃO ENVOLVIDAS EM CHAMAS .....	186
3.4.1.1	Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas .....	186
3.4.1.2	Fluxo de Calor por Radiação das Chamas .....	186
3.4.1.3	Convecção das Chamas e Gases Quentes .....	187
3.4.1.4	Absortividade das Chamas .....	188

3.4.2	PEÇAS ENVOLVIDAS EM CHAMAS .....	188
3.4.2.1	Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas .....	189
3.4.2.2	Fluxo de Calor por Radiação das Chamas .....	189
3.4.2.2.1	<i>Pilares Envolvidos em Chamas</i> .....	189
3.4.2.2.2	<i>Vigas Totalmente ou Parcialmente Envolvidas em Chamas</i> .....	190
3.4.2.2.2.1	<i>Ventilação Natural</i> .....	190
3.4.2.2.2.2	<i>Ventilação Forçada</i> .....	191
3.4.2.3	Convecção das Chamas e Gases Quentes .....	193
3.4.2.4	Absortividade das Chamas .....	193
3.5	<u>FATOR DE CONFIGURAÇÃO</u> .....	193
3.6	<u>FATOR DE CONFIGURAÇÃO TOTAL</u> .....	195
3.7	<u>FLUXOGRAMA</u> .....	196
3.8	<u>EXEMPLOS</u> .....	202
3.8.1	AQUECIMENTO DE PILAR EXTERNO SENDO A ABERTURA 12 x 3m E A DISTÂNCIA DO PILAR AO COMPARTIMENTO IGUAL A 0,5m .....	202
3.8.1.1	Dimensões do Compartimento ...	202
3.8.1.2	Carga Total de Incêndio .....	203
3.8.1.3	Sob Condições de Ventilação Natural .....	203
3.8.1.3.1	<i>Condição de Queima- Livre</i> .....	203
3.8.1.3.2	<i>Condição de Ventilação Controlada</i> .....	203
3.8.1.3.3	<i>Taxa de Queima</i> .....	203

3.8.1.3.4	<i>Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento</i>	....	203
3.8.1.3.5	<i>Altura da Chama</i>	.....	204
3.8.1.3.6	<i>Projeção Horizontal da Chama</i>	.....	204
3.8.1.3.7	<i>Largura da Chama</i>	.....	204
3.8.1.3.8	<i>Profundidade da Chama</i>	..	204
3.8.1.3.9	<i>Comprimento da Chama ao longo do Eixo</i>	.....	204
3.8.1.3.10	<i>Temperatura da Chama na Janela</i>	.....	205
3.8.1.3.11	<i>Emissividade na Janela</i>	..	205
3.8.1.3.12	<i>Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo</i>	.....	205
3.8.1.4	<i>Sob Condições de Ventilação Forçada</i>	.....	206
3.8.1.4.1	<i>Taxa de Queima</i>	.....	206
3.8.1.4.2	<i>Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento</i>	....	206
3.8.1.4.3	<i>Altura da Chama</i>	.....	206
3.8.1.4.4	<i>Projeção Horizontal da Chama</i>	.....	206
3.8.1.4.5	<i>Largura da Chama</i>	.....	206
3.8.1.4.6	<i>Comprimento da Chama ao longo do Eixo</i>	.....	206
3.8.1.4.7	<i>Temperatura da Chama na Janela</i>	.....	207
3.8.1.4.8	<i>Emissividade na Janela</i>	..	207
3.8.1.4.9	<i>Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo</i>	.....	207
3.8.1.5	<i>Fator de Configuração</i>	.....	208
3.8.1.5.1	<i>Janela como Superfície Irradiante</i>	.....	208

3.8.1.5.1.1	<i>Fator de</i>	
	<i>Configuração Total</i>	.. 210
3.8.1.5.2	<i>Chama como Superfície</i>	
	<i>Irradiante</i>	..... 210
3.8.1.6	Coeficiente de Transferência	
	de Calor por Convecção	..... 210
3.8.1.6.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 210
3.8.1.6.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 211
3.8.1.7	Absortividade da Chama	..... 211
3.8.1.8	Fluxo de Calor por Radiação das	
	Aberturas	..... 212
3.8.1.8.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 212
3.8.1.8.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 212
3.8.1.9	Fluxo de Calor por Radiação das	
	Chamas	..... 212
3.8.1.9.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 212
3.8.1.9.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 212
3.8.1.10	Temperatura Média do Aço	.... 213
3.8.1.10.1	<i>Ventilação Natural</i>	... 213
3.8.1.10.2	<i>Ventilação Forçada</i>	... 213
3.8.2	AQUECIMENTO DE PILAR EXTERNO SENDO A	
	ABERTURA 3 x 1,20m E A DISTÂNCIA DO PILAR	
	AO COMPARTIMENTO IGUAL A 0,5m	..... 214
3.8.2.1	Dimensões do Compartimento	... 214
3.8.2.2.	Carga Total de Incêndio	..... 215
3.8.2.3	Sob Condições de Ventilação	
	Natural	..... 215
3.8.2.3.1	<i>Condição de Queima-</i>	
	<i>Livre</i>	..... 215
3.8.2.3.2	<i>Condição de Ventilação</i>	
	<i>Controlada</i>	..... 215
3.8.2.3.3	<i>Taxa de Queima</i>	..... 215



3.8.2.3.4	<i>Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento</i>	....	215
3.8.2.3.5	<i>Altura da Chama</i>	.....	216
3.8.2.3.6	<i>Projeção Horizontal da Chama</i>	.....	216
3.8.2.3.7	<i>Largura da Chama</i>	.....	216
3.8.2.3.8	<i>Profundidade da Chama</i>	..	216
3.8.2.3.9	<i>Comprimento da Chama ao longo do Eixo</i>	.....	216
3.8.2.3.10	<i>Temperatura da Chama na Janela</i>	.....	216
3.8.2.3.11	<i>Emissividade na Janela</i>	..	217
3.8.2.3.12	<i>Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo</i>	.....	217
3.8.2.4	<i>Sob Condições de Ventilação Forçada</i>	.....	217
3.8.2.4.1	<i>Taxa de Queima</i>	.....	217
3.8.2.4.2	<i>Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento</i>	....	217
3.8.2.4.3	<i>Altura da Chama</i>	.....	217
3.8.2.4.4	<i>Projeção Horizontal da Chama</i>	.....	218
3.8.2.4.5	<i>Largura da Chama</i>	.....	218
3.8.2.4.6	<i>Comprimento da Chama ao longo do seu Eixo</i>	.....	218
3.8.2.4.7	<i>Temperatura da Chama na Janela</i>	.....	218
3.8.2.4.8	<i>Emissividade na Janela</i>	..	218
3.8.2.4.9	<i>Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo</i>	.....	218
3.8.2.5	<i>Fator de Configuração</i>	.....	220
3.8.2.5.1	<i>Janela como Superfície Irradiante</i>	.....	220

3.8.2.5.1.1	<i>Fator de</i>	
	<i>Configuração Total</i>	.. 221
3.8.2.5.2	<i>Chama como Superfície</i>	
	<i>Irradiante</i>	..... 222
3.8.2.6	Coeficiente de Transferência	
	de Calor por Convecção	..... 222
3.8.2.6.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 222
3.8.2.6.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 223
3.8.2.7	Absortividade da Chama	..... 223
3.8.2.8	Fluxo de Calor por Irradiação	
	das Aberturas	..... 224
3.8.2.8.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 224
3.8.2.8.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 225
3.8.2.9	Fluxo de Calor por Radiação	
	das Chamas	..... 225
3.8.2.9.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 225
3.8.2.9.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 225
3.8.2.10	Temperatura Média do Aço	.... 226
3.8.2.10.1	<i>Ventilação Natural</i>	... 226
3.8.2.10.2	<i>Ventilação Forçada</i>	... 226
3.8.3	AQUECIMENTO DE PILAR EXTERNO SENDO A	
	ABERTURA 3 x 1,20m E A DISTÂNCIA DO PILAR	
	AO COMPARTIMENTO IGUAL A 0,9m	..... 226
3.8.3.1	Dimensões do Compartimento	... 227
3.8.3.2.	Carga Total de Incêndio	..... 227
3.8.3.3	Sob Condições de Ventilação	
	Natural	..... 228
3.8.3.3.1	<i>Condição de Queima-</i>	
	<i>Livre</i>	..... 228
3.8.3.3.2	<i>Condição de Ventilação</i>	
	<i>Controlada</i>	..... 228
3.8.3.3.3	<i>Taxa de Queima</i>	..... 228

3.8.3.3.4	<i>Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento</i>	....	228
3.8.3.3.5	<i>Altura da Chama</i>	.....	228
3.8.3.3.6	<i>Projeção Horizontal da Chama</i>	.....	229
3.8.3.3.7	<i>Largura da Chama</i>	.....	229
3.8.3.3.8	<i>Profundidade da Chama</i>	..	229
3.8.3.3.9	<i>Comprimento da Chama ao longo do Eixo</i>	.....	229
3.8.3.3.10	<i>Temperatura da Chama na Janela</i>	.....	229
3.8.3.3.11	<i>Emissividade na Janela</i>	..	229
3.8.3.3.12	<i>Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo</i>	.....	230
3.8.3.4	<i>Sob Condições de Ventilação Forçada</i>	.....	230
3.8.3.4.1	<i>Taxa de Queima</i>	.....	230
3.8.3.4.2	<i>Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento</i>	....	230
3.8.3.4.3	<i>Altura da Chama</i>	.....	230
3.8.3.4.4	<i>Projeção Horizontal da Chama</i>	.....	230
3.8.3.4.5	<i>Largura da Chama</i>	.....	231
3.8.3.4.6	<i>Comprimento da Chama ao longo do seu Eixo</i>	.....	231
3.8.3.4.7	<i>Temperatura da Chama na Janela</i>	.....	231
3.8.3.4.8	<i>Emissividade na Janela</i>	..	231
3.8.3.4.9	<i>Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo</i>	.....	231
3.8.3.5	<i>Fator de Configuração</i>	.....	232
3.8.3.5.1	<i>Janela como Superfície Irradiante</i>	.....	232

3.8.3.5.1.1	<i>Fator de</i>	
	<i>Configuração Total</i>	.. 234
3.8.3.5.2	<i>Chama como Superfície</i>	
	<i>Irradiante</i>	..... 234
3.8.3.5.2.1	<i>Ventilação</i>	
	<i>Natural</i>	..... 234
3.8.3.5.2.1.1	<i>Fator de</i>	
	<i>Configuração Total</i>	.. 236
3.8.3.5.2.2	<i>Ventilação</i>	
	<i>Forçada</i>	..... 237
3.8.3.6	Coeficiente de Transferência de	
	Calor por Convecção	..... 237
3.8.3.6.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 237
3.8.3.6.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 237
3.8.3.7	Absortividade da Chama	..... 237
3.8.3.7.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 237
3.8.3.7.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 237
3.8.3.8	Fluxo de Calor por Radiação	
	das Aberturas	..... 238
3.8.3.8.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 238
3.8.3.8.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 238
3.8.3.9	Fluxo de Calor por Radiação	
	das Chamas	..... 239
3.8.3.9.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 239
3.8.3.9.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 239
3.8.3.10	Temperatura Média do Aço	.... 239
3.8.3.10.1	<i>Ventilação Natural</i>	.... 239
3.8.3.10.2	<i>Ventilação Forçada</i>	.... 240
3.8.4	AQUECIMENTO DE VIGA EXTERNA SENDO A	
	ABERTURA 12 x 3m	..... 240
3.8.4.1	Dimensões do Compartimento	... 240
3.8.4.2	Carga Total de Incêndio	..... 241

3.8.4.3 Sob Condições de Ventilação	
Natural .....	241
3.8.4.3.1 Condição de Queima	
-Livre .....	241
3.8.4.3.2 Condição de Ventilação	
Controlada .....	241
3.8.4.3.3 Taxa de Queima .....	242
3.8.4.3.4 Temperatura do Incêndio	
dentro do Compartimento ....	242
3.8.4.3.5 Altura da Chama .....	242
3.8.4.3.6 Projeção Horizontal	
da Chama .....	242
3.8.4.3.7 Largura da Chama .....	242
3.8.4.3.8 Profundidade da Chama ..	243
3.8.4.3.9 Comprimento da Chama	
ao longo do Eixo .....	243
3.8.4.3.10 Temperatura da Chama	
na Janela .....	243
3.8.4.3.11 Emissividade na	
Janela .....	243
3.8.4.3.12 Temperatura da Chama	
no Flange Inferior .....	243
3.8.4.3.13 Temperatura da Chama	
no Flange Superior .....	243
3.8.4.3.14 Emissividade da	
Chama .....	244
3.8.4.3.14.1 Emissividade da	
Chama para o Flange	
Inferior .....	244
3.8.4.3.14.2 Emissividade da	
Chama para a Alma ..	244

3.8.4.3.14.3	<i>Emissividade da Chama para o Flange Superior</i>	244
3.8.4.4	Sob Condições de Ventilação	
	Forçada	245
3.8.4.4.1	<i>Taxa de Queima</i>	245
3.8.4.4.2	<i>Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento</i>	245
3.8.4.4.3	<i>Altura da Chama</i>	245
3.8.4.4.4	<i>Projeção Horizontal da Chama</i>	245
3.8.4.4.5	<i>Largura da Chama</i>	245
3.8.4.4.6	<i>Comprimento da Chama ao longo do Eixo</i>	245
3.8.4.4.7	<i>Temperatura da Chama na Janela</i>	246
3.8.4.4.8	<i>Emissividade na Janela</i>	246
3.8.4.4.9	<i>Temperatura da Chama no Flange Inferior</i>	246
3.8.4.4.10	<i>Temperatura da Chama no Flange Superior</i>	247
3.8.4.4.11	<i>Emissividade da Chama</i>	247
3.8.4.4.11.1	<i>Emissividade da Chama para o Flange Inferior</i>	247
3.8.4.4.11.2	<i>Emissividade da Chama para a Alma</i>	247
3.8.4.4.11.3	<i>Emissividade da Chama para o Flange Superior</i>	248
3.8.4.5	Fator de Configuração	248

3.8.4.5.1	<i>Janela como Superfície</i>	
	<i>Irradiante</i> .....	248
3.8.4.5.1.1	<i>Fator de</i>	
	<i>Configuração Total</i> ..	249
3.8.4.5.2	<i>Chama como Superfície</i>	
	<i>Irradiante</i> .....	249
3.8.4.5.2.1	<i>Ventilação</i>	
	<i>Natural</i> .....	249
3.8.4.5.2.2	<i>Ventilação</i>	
	<i>Forçada</i> .....	250
3.8.4.5.2.2.1	<i>Fator de</i>	
	<i>Configuração Total</i> ..	251
3.8.4.6	<i>Coefficiente de Transferência de</i>	
	<i>Calor por Convecção</i> .....	251
3.8.4.6.1	<i>Ventilação Natural</i> ....	251
3.8.4.6.2	<i>Ventilação Forçada</i> ....	252
3.8.4.7	<i>Absortividade da Chama</i> .....	252
3.8.4.7.1	<i>Ventilação Natural</i> ....	252
3.8.4.7.2	<i>Ventilação Forçada</i> ....	252
3.8.4.8	<i>Fluxo de Calor por Radiação</i>	
	<i>das Aberturas</i> .....	252
3.8.4.8.1	<i>Ventilação Natural</i> ....	252
3.8.4.8.2	<i>Ventilação Forçada</i> ....	252
3.8.4.9	<i>Fluxo de Calor por Radiação</i>	
	<i>das Chamas</i> .....	253
3.8.4.9.1	<i>Ventilação Natural</i> ....	253
3.8.4.9.1.1.	<i>Flange</i>	
	<i>Inferior</i> .....	253
3.8.4.9.1.2	<i>Alma</i> .....	253
3.8.4.9.1.3	<i>Flange</i>	
	<i>Superior</i> .....	253

3.8.4.9.1.4	<i>Fluxo de Calor</i>	
	<i>Total por Radiação das</i>	
	<i>Chamas</i> .....	253
3.8.4.9.2	<i>Ventilação Forçada</i> ....	253
3.8.4.9.2.1.	<i>Flange</i>	
	<i>Inferior</i> .....	253
3.8.4.9.2.2	<i>Alma</i> .....	254
3.8.4.9.2.3	<i>Flange</i>	
	<i>Superior</i> .....	254
3.8.4.9.2.4	<i>Fluxo de Calor</i>	
	<i>Total por Radiação das</i>	
	<i>Chamas</i> .....	254
3.8.4.10	<i>Temperatura Média do Aço</i> ....	254
3.8.4.10.1	<i>Ventilação Natural</i> ...	254
3.8.4.10.2	<i>Ventilação Forçada</i> ...	254
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS</b>	
	<b>FUTUROS</b> .....	256
4.1	<u>CONCLUSÕES</u> .....	256
4.2	<u>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u> .....	258
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	259
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	261
	<b>ANEXO - DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO</b>	
	<b>EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS EXTERNOS EM</b>	
	<b>SITUAÇÃO DE INCÊNDIO</b> .....	265
A.1	<u>DIMENSÕES DO COMPARTIMENTO DE INCÊNDIO</u> .....	265
A.1.1	COMPARTIMENTO SIMPLES DE INCÊNDIO ...	265
A.1.2	COMPARTIMENTO COM MAIS QUE UMA JANELA ..	266



A.1.3 COMPARTIMENTO COM JANELAS EM MAIS	
QUE UMA PAREDE .....	267
A.1.4 COMPARTIMENTO COM UM NÚCLEO .....	268
A.2 <u>CARACTERÍSTICAS DO INCÊNDIO E DA CHAMA</u> .....	269
A.2.1 VENTILAÇÃO NATURAL .....	269
A.2.1.1 Taxa de Queima .....	269
A.2.1.2 Temperatura do Incêndio dentro	
do Compartimento .....	270
A.2.1.3 Altura da Chama .....	271
A.2.1.4 Largura da Chama .....	272
A.2.1.5 Profundidade da Chama .....	273
A.2.1.6 Projeção Horizontal da Chama ..	273
A.2.1.7 Comprimento da Chama ao longo	
do seu Eixo .....	274
A.2.1.8 Temperatura da Chama na Janela ..	275
A.2.1.9 Emissividade na Janela .....	275
A.2.1.10 Temperatura da Chama ao longo	
do seu Eixo .....	275
A.2.1.11 Emissividade da Chama .....	276
A.2.2 VENTILAÇÃO FORÇADA .....	277
A.2.2.1 Taxa de Queima .....	277
A.2.2.2 Temperatura do Incêndio dentro	
do Compartimento .....	277
A.2.2.3 Altura da Chama .....	278
A.2.2.4 Projeção Horizontal da Chama ..	278
A.2.2.5 Largura da Chama .....	279
A.2.2.6 Comprimento da Chama ao longo	
do Eixo .....	279
A.2.2.7 Temperatura da Chama na Janela ..	280
A.2.2.8 Emissividade na Janela .....	281
A.2.2.9 Temperatura da Chama ao longo	
do Eixo .....	281

A.2.2.9.1	<i>Pilares não Envolvidos em Chamas</i>	281
A.2.2.9.2	<i>Vigas não Envolvidas em Chamas</i>	282
A.2.2.9.3	<i>Pilares Envolvidos em Chamas</i>	283
A.2.2.9.4	<i>Vigas Totalmente ou Parcialmente Envolvidas em Chamas</i>	285
A.2.2.10	<i>Emissividade da Chama</i>	285
A.3	<u>EQUILÍBRIO TÉRMICO</u>	286
A.3.1	PEÇAS NÃO ENVOLVIDAS EM CHAMAS	286
A.3.1.1	Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas	286
A.3.1.2	Fluxo de Calor por Radiação das Chamas	287
A.3.1.3	Convecção das Chamas e Gases Quentes	291
A.3.1.4	Absortividade das Chamas	291
A.3.2	PEÇAS ENVOLVIDAS EM CHAMAS	292
A.3.2.1	Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas	292
A.3.2.2	Fluxo de Calor por Radiação das Chamas	292
A.3.2.2.1	<i>Pilares Envolvidos em Chamas</i>	293
A.3.2.2.2	<i>Vigas Totalmente ou Parcialmente Envolvidas em Chamas</i>	294
A.3.2.2.2.1	<i>Ventilação Natural</i>	294
A.3.2.2.2.2	<i>Ventilação Forçada</i>	295

A.3.2.3 Convecção das Chamas e Gases	
Quentes .....	298
A.3.2.4 Absortividade das Chamas .....	
298	
A.4 <u>FATOR DE CONFIGURAÇÃO</u> .....	298
A.5 <u>FATOR DE CONFIGURAÇÃO TOTAL</u> .....	307

## SIMBOLOGIA

- a - índice referente ao ar ambiente externo
- $a_z$  - absortividade das chamas
- A - seção atravessada pelo calor
- $A_F$  - área de piso do compartimento
- $A_T$  - área total do piso, teto e paredes do compartimento menos a área da janela
- $A_w$  - área da janela ou soma da área das janelas em todas as paredes do compartimento
- b - coeficiente de extinção
- B - altura da alma da viga
- c - calor específico
- $c_z$  - calor específico da chama
- $c_1$  - comprimento do núcleo no compartimento incendiado
- $c_2$  - largura do núcleo no compartimento incendiado
- C - valor calorífico
- $C_j$  - coeficiente de proteção da face  $j$  da peça
- d - comprimento característico da superfície
- $d_j$  - dimensão da seção transversal da face  $j$  da peça
- D - índice referente ao lado direito da superfície irradiante
- D - profundidade do compartimento
- E - índice referente ao lado esquerdo da superfície irradiante
- f - índice referente ao incêndio dentro da edificação
- g - aceleração da gravidade
- q - densidade de carga de incêndio

- $h$  - altura da janela ou média ponderada das alturas das janelas em todas as paredes  
 $h_a$  - largura do toldo ou sacada  
 $h_z$  - altura até o topo da chama, acima da parte inferior da viga  
 $h'$  - altura da região na superfície irradiante  
 $H$  - altura do compartimento  
 $I_f$  - fluxo de calor por radiação das aberturas  
 $I_z$  - fluxo de calor por radiação da chama  
 $j$  - índice indicador da face da peça estrutural  
 $\kappa$  - calor perdido por condução para a área aquecida  
 $K$  - condutividade térmica do material  
 $K_z$  - condutividade térmica do gás  
 $\ell$  - comprimento, ao longo do eixo da chama, medido a partir da janela até o ponto onde o cálculo for feito  
 $L$  - carga total de incêndio  
 $M$  - massa por unidade de comprimento  
 $m$  - índice determinante do número de aberturas no lado  $m$  da chama  
 $n$  - índice determinante do número de aberturas no lado  $n$  da chama  
 $n$  - taxa da largura pela altura da metade superior da janela  
 $N_u$  - número de Nusselt  
 $p_s$  - perímetro da seção de aço  
 $P$  - ponto central de cada face do retângulo que envolve a superfície receptora  
 $Q$  - taxa de fluxo de calor  
 $r_o$  - raio efetivo da metade superior da janela  
 $R$  - taxa de queima  
 $Re$  - número de Reynolds

- s - índice referente ao aço externo
- S - distância entre a face externa da parede do compartimento e a peça estrutural
- $S_j'$  - distância do ponto P da face j da peça à superfície irradiante
- t - tempo
- $t_F$  - duração do incêndio a queima - livre
- T - temperatura
- $T_a$  - temperatura ambiente
- $T_f$  - temperatura do incêndio dentro do compartimento
- $T_\ell$  - temperatura local da chama
- $T_{max}$  - temperatura máxima no eixo do gás quente
- $T_m$  - temperatura média do gás quente
- $T_o$  - temperatura da chama na janela
- $T_s$  - temperatura média através da seção de aço
- $T_x$  - temperatura no topo da chama
- $T_\omega$  - temperatura da chama na região oposta ao topo da janela
- $T_z$  - temperatura da chama ao longo do seu eixo
- u - velocidade do vento
- $V_m$  - velocidade média do gás
- W - largura da parede do compartimento, a qual contém a janela ou as janelas
- $\chi$  - distância horizontal do topo da chama até a janela
- X - comprimento da chama ao longo do seu eixo
- y - distância vertical acima do topo da janela
- z - subíndice referente às chamas externas
- z - altura da chama acima da janela
- $\alpha_s$  - coeficiente de transferência de calor por convecção do aço
- $\alpha_z$  - coeficiente de transferência de calor por convecção da chama

- $\delta$  - espessura da camada limite
- $\Delta t$  - intervalo de tempo
- $\Delta T$  - diferença de temperatura entre o meio e a superfície em estudo
- $\Delta x$  - percurso realizado
- $\varepsilon_f$  - emissividade do incêndio dentro do compartimento
- $\varepsilon_o$  - emissividade na janela
- $\varepsilon_{Res}$  - coeficiente de transferência de calor
- $\varepsilon_s$  - emissividade da superfície de aço
- $\varepsilon_z$  - emissividade da chama
- $\varepsilon_{z,j}$  - emissividade da chama para as faces  $j$  do pilar
- $\phi_f$  - fator de configuração total da peça, considerando-se transferência de calor por radiação da abertura em relação à superfície de aço
- $\phi_{f,j}$  - fator de configuração da face  $j$  da peça, considerando-se transferência de calor por radiação da abertura
- $\phi_z$  - fator de configuração total da peça, considerando-se transferência de calor por radiação das chamas em relação à superfície de aço
- $\phi_{z,j}$  - fator de configuração da face  $j$  da peça, considerando-se transferência de calor por radiação da chama
- $\varphi$  - fator de perda
- $\lambda$  - espessura da chama
- $\mu_z$  - viscosidade do gás
- $\theta$  - ângulo entre a face do pilar em estudo e a superfície irradiante.
- $\theta_T$  - temperatura adimensional
- $\rho$  - massa específica

- $\rho_{ar}$  - densidade do ar na região
- $\rho_z$  - densidade do gás queimado
- $\sigma$  - constante de Stefan - Boltzmann
- $\nu$  - viscosidade cinemática
- $\omega$  - largura da janela ou soma das larguras das janelas em todas as paredes
- $\omega_z$  - largura máxima da chama
- $\omega'$  - largura da região irradiante



## FIGURAS

Figura 1.1: Curva padrão de aumento de temperatura dos gases em incêndio conforme ASTM E-119 ...	4
Figura 1.2: Curvas padronizadas tempo-temperatura conforme a ASTM E-119 e a ISO 834.5 .....	5
Figura 1.3: Estrutura de teste de Trenton antes do teste .....	5
Figura 1.4: Teste de incêndio de Trenton próximo ao tempo de intensidade máxima .....	6
Figura 1.5: Temperaturas médias durante os testes de incêndio .....	8
Figura 1.6: Vista de frente da Broadgate Exchange House .....	10
Figura 1.7: Vista da estrutura externa .....	11
Figura 1.8: Estrutura externa do Centre Pompidou .....	14
Figura 1.9: Vista da estrutura externa do museu .....	15
Figura 2.1: Evolução da temperatura dos gases em incêndio .....	19

Figura 2.2: Compartimento simples de incêndio .....	20
Figura 2.3: Compartimento com mais que uma janela ....	21
Figura 2.4: Compartimento com janelas em mais que uma parede .....	21
Figura 2.5: Compartimento com um núcleo .....	22
Figura 2.6: Inclinação da chama pelo vento .....	24
Figura 2.7: Inclinação da chama pelo vento, para pilares entre as janelas, sendo $A = a$ ou $A = C$ , o que for maior .....	25
Figura 2.8: Dimensões usadas nos cálculos da projeção da chama .....	28
Figura 2.9: Demarcação das regiões em frente ao edifício .....	30
Figura 2.10: Temperaturas médias no fluxo de gás quente, na fachada do edifício, a diferentes alturas .....	31
Figura 2.11: Representação das isotermas, para uma altura específica, do teste 1 de uma série de testes de incêndio, realizados em Lehrte .....	34

Figura 2.12: Variação de $R / A_w h^{1/2}$ com o tamanho do compartimento e a ventilação, como dado por Thomas através dos dados do CIB ..	38
Figura 2.13: Variação do crescimento da temperatura média de um incêndio com o tamanho do compartimento e a área da janela, considerando ventilação natural .....	40
Figura 2.14: Variação do crescimento da temperatura média de um incêndio com a carga de incêndio, o tamanho do compartimento e a área da janela, considerando ventilação natural .....	41
Figura 2.15: Dimensões da chama para ventilação natural .....	44
Figura 2.16: Alturas das chamas em testes em escala natural com ventilação natural .....	45
Figura 2.17: Inclinação da chama por uma sacada .....	47
Figura 2.18: Projeção horizontal do topo da chama para testes em escala natural com ventilação natural, considerando parede acima da janela .....	50
Figura 2.19: Distribuição da temperatura da chama para testes em escala natural com ventilação natural .....	56

Figura 2.20: Variação do crescimento da temperatura média de um incêndio com a carga de incêndio, o tamanho do compartimento e a área da janela, considerando ventilação forçada, sendo os dados dos Laboratórios Underwriters .....	59
Figura 2.21: Alturas da chama para ensaios em escala natural com ventilação forçada, considerando os dados dos Laboratórios Underwriters .....	62
Figura 2.22: Dimensões da chama para ventilação forçada .....	62
Figura 2.23: Projeção horizontal da chama para ensaios em escala natural com ventilação forçada, considerando os dados dos Laboratórios Underwriters .....	64
Figura 2.24: Vista de cima das chamas emergentes com ventilação forçada .....	65
Figura 2.25: Distribuição da temperatura da chama para ensaios em escala natural com ventilação forçada, considerando os dados dos Laboratórios Underwriters .....	69
Figura 2.26: Inclinação da chama por um toldo .....	71
Figura 2.27: Dimensões e faces dos pilares .....	72
Figura 2.28: Dimensões e faces das vigas .....	73

Figura 2.29: Pilares em frente às janelas em apenas uma parede do compartimento .....	74
Figura 2.30: Pilares em frente às janelas em duas paredes do compartimento .....	79
Figura 2.31: Transferência de calor por condução .....	81
Figura 2.32: Condução em regime permanente .....	83
Figura 2.33: Movimentação de um fluido em um ambiente sob a ação de chamas localizadas .....	86
Figura 2.34: Conceito de camada limite no escoamento sobre uma placa plana .....	89
Figura 2.35: Conceito de camada limite no escoamento sobre um corpo curvo e a separação do fluxo .....	92
Figura 2.36: Conceito de camada limite térmica no escoamento de um fluido quente sobre uma placa fria .....	93
Figura 2.37: Localização das temperaturas .....	96
Figura 2.38: Fluxo de calor das chamas acima das janelas, em ensaios em escala natural, realizados em Borehamwood, comparado ao fluxo de calor calculado para as chamas com emissividade total .....	107

Figura 2.39: Soma da radiação da janela e da chama recebida por um radiômetro a 4,5m ou 6m de distância, em ensaios em escala natural, em Borehamwood .....	109
Figura 2.40: Invólucro ao redor das superfícies receptoras .....	113
Figura 2.41: Superfície receptora em um plano paralelo ao plano da superfície irradiante .....	114
Figura 2.42: Superfície receptora perpendicular ao plano da superfície irradiante .....	114
Figura 2.43: Superfície receptora em um plano de ângulo $\theta$ com relação ao plano da superfície irradiante .....	116
Figura 2.44: Localização e dimensões do pilar, ao considerá-lo em frente à janela, para todas as condições de ventilação, sendo a chama como superfície irradiante .....	120
Figura 2.45: Localização e dimensões do pilar, ao considerá-lo em frente à janela, para todas as condições de ventilação, sendo a janela como superfície irradiante .....	125

Figura 2.46: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela, com ventilação natural e a chama estimada como superfície irradiante .....	127
Figura 2.47: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela e a janela como superfície irradiante .....	133
Figura 2.48: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela, com ventilação forçada e a chama como superfície irradiante .....	137
Figura 2.49: Viga de bordo com mesas protegidas e ventilação natural .....	140
Figura 2.50: Viga de bordo com anteparo e condições de ventilação forçada .....	141
Figura 2.51: Posições dos pilares .....	143
Figura 2.52: Pilar em frente a uma abertura .....	144
Figura 2.53: Pilar entre aberturas .....	147
Figura 2.54: Temperaturas medidas e calculadas dos pilares não envolvidos em chamas, para os testes em escala natural com ventilação natural .....	149

Figura 2.55: Temperaturas medidas e calculadas dos pilares não envolvidos em chamas, para os testes em escala natural com ventilação forçada, considerando os dados obtidos dos Laboratórios Underwriters .....	149
Figura 2.56: Viga não envolvida em chamas .....	152
Figura 2.57: Temperaturas medidas e calculadas de uma viga de separação dos andares, considerando ventilação forçada, tendo em vista os dados dos Laboratórios Underwriters .....	155
Figura 2.58: Pilar envolvido em chamas .....	159
Figura 2.59: Temperaturas medidas e calculadas dos pilares envolvidos em chamas, considerando-se ventilação natural .....	161
Figura 2.60: Pilares protegidos .....	162
Figura 2.61: Temperaturas medidas e calculadas dos pilares de aço envolvidos em chamas, para testes em escala natural com ventilação forçada, considerando os dados dos Laboratórios Underwriters .....	163
Figura 2.62: Viga envolvida em chamas .....	165



Figura 2.63: Temperaturas medidas e calculadas das vigas de divisão dos andares, envolvidas em chamas, para os testes em escala natural com corrente de ar natural .....	167
Figura 2.64: Vigas protegidas .....	167
Figura 3.1: Dimensões do compartimento .....	202
Figura 3.2: Dimensões da chama para ventilação natural .....	205
Figura 3.3: Dimensões da chama para ventilação forçada .....	207
Figura 3.4: Pilar envolvido em chamas .....	208
Figura 3.5: Janela como superfície irradiante .....	209
Figura 3.6: Dimensões do pilar .....	210
Figura 3.7: Pilar envolvido em chamas .....	211
Figura 3.8: Dimensões do compartimento .....	214
Figura 3.9: Dimensões da chama para ventilação forçada .....	219
Figura 3.10: Pilar envolvido em chamas .....	219
Figura 3.11: Janela como superfície irradiante .....	220
Figura 3.12: Chama como superfície irradiante .....	223

Figura 3.13: Pilar envolvido em chamas, para ventilação natural .....	223
Figura 3.14: Pilar envolvido em chamas, para ventilação forçada .....	224
Figura 3.15: Dimensões do compartimento .....	227
Figura 3.16: Pilar envolvido em chamas .....	232
Figura 3.17: Janela como superfície irradiante .....	233
Figura 3.18: Chama como superfície irradiante, para ventilação natural .....	235
Figura 3.19: Pilar envolvido em chamas, para ventilação forçada .....	238
Figura 3.20: Dimensões do compartimento .....	241
Figura 3.21: Dimensões da chama para ventilação natural .....	244
Figura 3.22: Dimensões da chama para ventilação forçada .....	246
Figura 3.23: Janela como Superfície Irradiante .....	249
Figura 3.24: Chama como superfície irradiante, para ventilação forçada .....	250
Figura A.1: Compartimento simples de incêndio .....	266

Figura A.2: Compartimento com mais que uma janela ...	267
Figura A.3: Compartimento com janelas em mais de uma parede .....	268
Figura A.4: Compartimento com um núcleo .....	269
Figura A.5: Dimensões usadas nos cálculos da projeção da chama .....	271
Figura A.6: Inclinação da chama por uma sacada .....	272
Figura A.7: Dimensões da chama para ventilação natural .....	273
Figura A.8: Vista de cima das chamas emergentes com ventilação forçada .....	279
Figura A.9: Dimensões da chama para ventilação forçada .....	280
Figura A.10: Dimensões e faces dos pilares .....	282
Figura A.11: Dimensões e faces das vigas .....	283
Figura A.12: Pilar envolvido em chamas .....	284
Figura A.13: Pilar em frente a uma abertura .....	288
Figura A.14: Pilar entre aberturas .....	290
Figura A.15: Viga envolvida em chamas .....	297

Figura A.16: Invólucro ao redor das superfícies receptoras .....	299
Figura A.17: Localização e dimensões do pilar, ao considerá-lo em frente à janela, para todas as condições de ventilação, sendo a chama como superfície irradiante .....	300
Figura A.18: Localização e dimensões do pilar, ao considerá-lo em frente à janela, para todas as condições de ventilação, sendo a janela como superfície irradiante .....	301
Figura A.19: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela, com ventilação natural e a chama estimada como superfície irradiante .....	302
Figura A.20: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela e a janela como superfície irradiante .....	303
Figura A.21: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela, com ventilação forçada e a chama como superfície irradiante .....	304

Figura A.22: Superfície receptora em um plano paralelo ao plano da superfície irradiante .....	305
Figura A.23: Superfície receptora perpendicular ao plano da superfície irradiante .....	306
Figura A.24: Superfície receptora em um plano de ângulo $\theta$ com relação ao plano da superfície irradiante .....	307

## TABELAS

Tabela 2.1: Distância mínima de segurança contra incêndio entre a janela e a extremidade do pilar, considerando-se pilares entre as janelas .....	25
Tabela 2.2: Distância mínima de segurança, $S$ , entre a face da parede externa do compartimento e o pilar, considerando-se apenas uma parede .....	75
Tabela 2.3: Distância mínima de segurança, $S$ , entre a face da parede externa do compartimento e o pilar, considerando-se duas paredes .....	77
Tabela 2.4: Viga de bordo com flanges protegidos e ventilação natural .....	139
Tabela 2.5: Projeção horizontal do anteparo para viga de bordo com ventilação forçada ....	141

## GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Fator de configuração considerando a superfície irradiante perpendicular à face do pilar em estudo, ou seja, um ângulo $\theta=90^\circ$ .....	119
Gráfico 2.2: Fator de configuração considerando a superfície irradiante paralela à face do pilar em estudo .....	122
Gráfico 2.3: Fator de configuração para $\theta = 45^\circ$ .....	129
Gráfico 2.4: Fator de configuração para $\theta = 135$ .....	130

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 GENERALIDADES

Ao se projetar uma edificação, além de se fazer o dimensionamento da estrutura à temperatura ambiente, deve-se também fazer a verificação desta estrutura em caso de ocorrência de incêndio. Isto porque as propriedades mecânicas dos materiais estruturais debilitam-se progressivamente com o aumento da temperatura, podendo provocar o colapso da estrutura em um tempo relativamente reduzido, o que pode causar uma série de problemas, inclusive a perda de vidas humanas.

Nos Estados Unidos, na Europa, na Oceania e no Japão, a preocupação com a segurança das pessoas em caso de incêndio em edificações é bastante antiga. Pesquisas são desenvolvidas continuamente e existem normas e especificações que regulamentam o assunto em todos os seus aspectos, quais sejam:

- prevenção do incêndio (uso de materiais não inflamáveis, instalações projetadas de acordo com regulamentos específicos);
- extinção do incêndio (rede de hidrantes, chuveiros automáticos, extintores, brigada particular de combate ao fogo);



- compartimentação da edificação (portas corta-fogo e também outros tipos de "barreiras" que evitam a propagação do incêndio);
- fuga das pessoas (sistema de exaustação de fumaça, rotas de fuga com sinalização e proteção adequadas, escadas de segurança);
- dimensionamento das estruturas em situação de incêndio, de acordo com as normas ou especificações, incluindo a verificação da necessidade de sua proteção, caso a resistência de cálculo em incêndio seja menor que a solicitação de cálculo em incêndio.

No caso das estruturas de aço, o dimensionamento em situação de incêndio apenas recentemente tem merecido atenção por parte de autoridades públicas e pesquisadores em nosso país. Numa atitude pioneira desde 1995, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo emprega um modelo de análise que cruza dados sobre a altura da edificação, número de andares, área e finalidade do prédio. A partir daí, é definido o tempo de resistência ao fogo exigido da estrutura.

Também em 1995, algumas universidades brasileiras, como a UFMG, a USP e a UFOP começaram a desenvolver estudos e pesquisas sobre o assunto, a partir dos quais foi editada pela ABNT uma norma brasileira para dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio, a qual recebeu a sigla de NBR 14323 (1). Essa norma fornece detalhadamente o procedimento a ser seguido para a obtenção da temperatura em elementos estruturais de aço situados no interior de um edifício sob incêndio, elementos estruturais que podem estar ou não protegidos, tendo por base o

Eurocode 3 Part 1-2 (2). Para as estruturas externas, no entanto, esta norma não contém um procedimento específico. Apresenta apenas idéias genéricas e indica que pode ser usado o Eurocode 3 Part 1-2 (2) ou outra norma ou especificação estrangeira reconhecida internacionalmente. Cita ainda que a elevação de temperatura pode ser obtida como nas estruturas internas, o que estará a favor da segurança, uma vez que a severidade do incêndio no exterior de um edifício é consideravelmente menor que no interior do mesmo e também que, em muitas condições, as peças estruturais externas de aço poderão ser usadas sem nenhuma proteção contra incêndio. Claro que, obtida a temperatura nos elementos estruturais, a NBR 14323 (1) apresenta metodologias para o dimensionamento dos mesmos.

A rigor, a elevação de temperatura nas estruturas externas tem sido pouco pesquisada e o conhecimento existente no momento deve-se principalmente a um trabalho de Law (3). O Eurocode 3 Part 1-2 (2) e o AISI (4) são as únicas especificações que abordam o assunto com o nível de profundidade adequado. Apesar disso, dado o grau de complexidade do problema, o uso não é simples e demanda experiência e conhecimento adicionais.

## 1.2 TRABALHOS PRODUZIDOS

Existem poucos trabalhos produzidos relacionados à segurança da estrutura externa de aço em situação de incêndio. Dentre estes, os mais significativos são citados nos parágrafos seguintes.

Seigel (5) realizou um estudo da severidade do incêndio e da projeção da chama externa aos edifícios. Os resultados desse estudo combinados aos resultados da análise teórica têm levado ao desenvolvimento de vários princípios de projetos, através dos quais estruturas externas de aço aparentes podem ser protegidas do incêndio que ocorre no interior de um edifício. Um desses princípios envolve o uso de anteparos horizontais, os quais possuem inclusive função arquitetônica. Realizaram-se dois testes para demonstrar a eficácia desses anteparos horizontais na condição de proteção contra incêndio para as vigas aparentes de aço externas de tal edifício. Um foi o teste de queima de madeira, a alta intensidade e com curta duração. O outro foi um teste de três horas com um incêndio a gás, o qual foi controlado de acordo com a curva padrão tempo-temperatura ASTM E-119 (6), mostrada na figura 1.1. Essa curva é aproximadamente igual à curva ISO 834 (7) e à curva padrão tempo-temperatura da NBR 5627 (8), conforme mostra a figura 1.2.

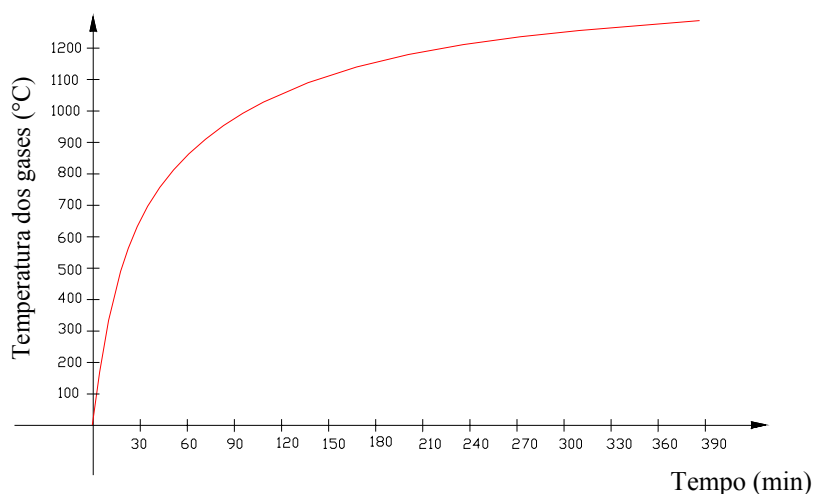


Figura 1.1: Curva padrão de aumento de temperatura dos gases em incêndio conforme ASTM E-119

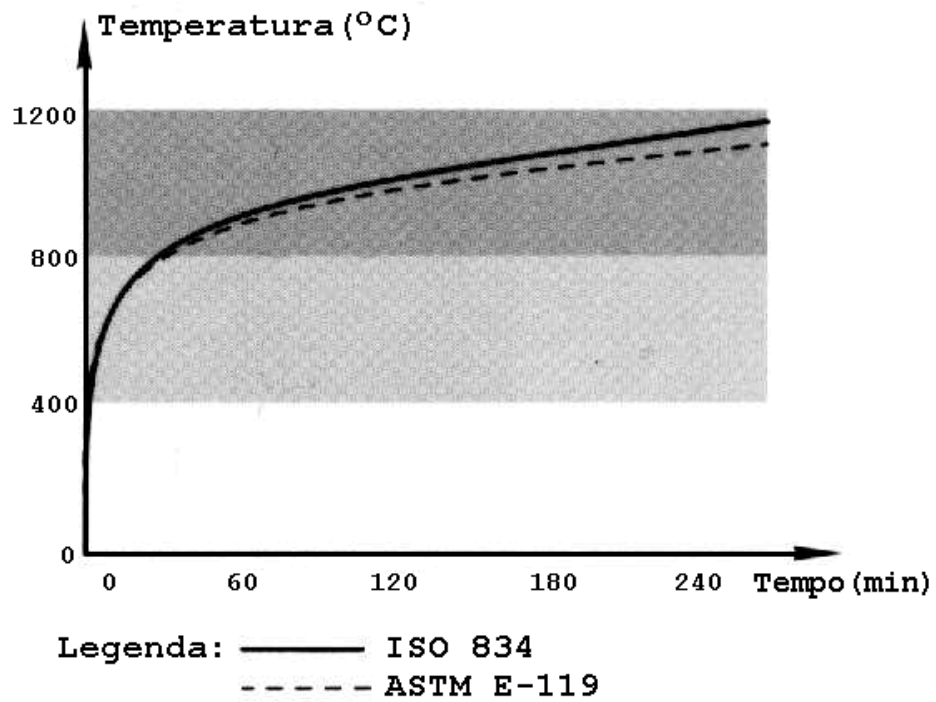


Figura 1.2: Curvas padronizadas tempo-temperatura conforme a ASTM E-119 e a ISO 834.

Segundo Seigel (5), o teste de queima foi realizado em Trenton, N.J., onde dispôs-se de um modelo em tamanho natural, conforme mostra a figura 1.3.

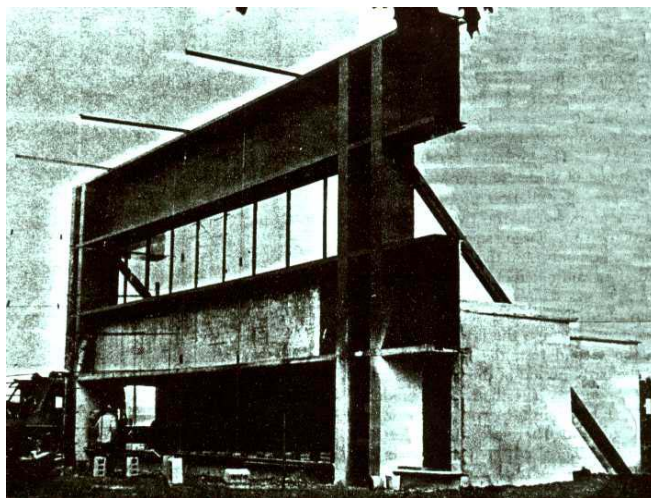


Figura 1.3: Estrutura de teste de Trenton antes do teste

Para este teste, o incêndio se desenvolveu rapidamente logo após a ignição e alcançou temperaturas bem mais altas que aquelas encontradas na curva padrão ASTM E-119 (6). Grandes chamas emergiram das janelas do compartimento em incêndio, e se mantiveram próximas à face do edifício conforme a figura 1.4, com um vento que variava de 1,788m/s a 3,576m/s.

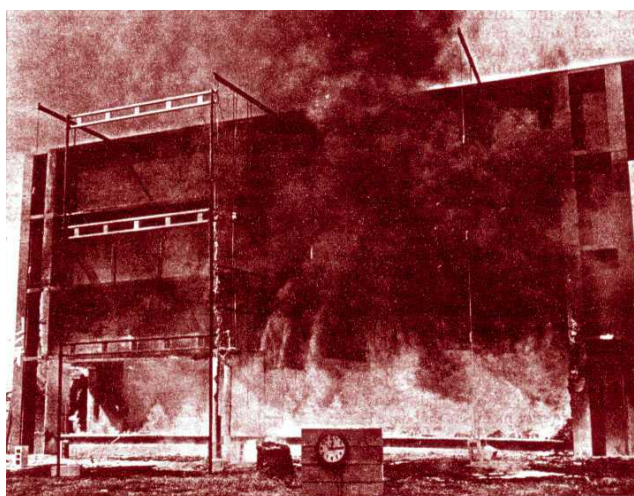


Figura 1.4: Teste de incêndio de Trenton próximo ao tempo de intensidade máxima

Embora o teste de queima-livre tenha dado origem a um incêndio com uma rápida elevação de temperatura em um curto intervalo de tempo, as suas características tempo-temperatura não coincidiram com o teste de incêndio padrão definido pela ASTM E-119 (6). Portanto, devido à maioria das normas prediais serem baseadas na exposição do incêndio padrão, segundo Seigel (5) foi elaborado um outro teste nos Laboratórios Underwriters em Northbrook III, onde um compartimento especial de incêndio foi construído para produzir um incêndio comparável ao padrão determinado. Para este teste, instalaram-se 50 jatos de gás com válvulas de

controle remoto no piso do compartimento. Em uma parede do compartimento estava localizada uma janela aberta, sendo que a viga de teste foi colocada acima desta abertura. O teste teve duração de três horas e a temperatura dentro do compartimento foi controlada a fim de produzir a curva padrão tempo-temperatura ASTM E-119 (6). Chamas similares às aquelas do teste de queima-livre foram projetadas do compartimento, mas havia pouca fumaça.

A eficácia dos anteparos horizontais, a fim de fornecer proteção contra incêndio à superfície externa de uma grande viga, foi claramente demonstrada através dos resultados desses testes. Não foi atingido nenhum valor excessivo de temperatura do aço, como mostrado na figura 1.5, assim também como nenhum dano estrutural à viga foi registrado nos testes. Portanto, esses resultados mostram que os anteparos horizontais protegeram a viga com sucesso em ambos os testes.

É interessante notar que no teste de queima-livre, com uma temperatura máxima de incêndio de 927,7°C, a temperatura alcançada pela viga foi maior que no incêndio de três horas do incêndio padrão ASTM E-119 (6), durante o qual a temperatura máxima de incêndio foi de 1051,7°C. A razão principal para esta diferença na temperatura da viga foi a diferença nas propriedades da radiação das chamas produzidas nos dois testes. No teste de queima, as grandes chamas enfumaçadas se desenvolveram rapidamente, sendo que estas chamas emitiram radiação com maior eficiência que as chamas de menor emissividade de gás durante o incêndio controlado do segundo teste. Além do mais, devido ao incêndio ter sido controlado no segundo teste, as chamas produzidas no início do teste foram muito menores e mais

frias que aquelas produzidas pela madeira durante a queima-livre no teste de queima. Portanto, a temperatura da viga cresceu mais devagar no teste do compartimento incendiado com queima de gás.

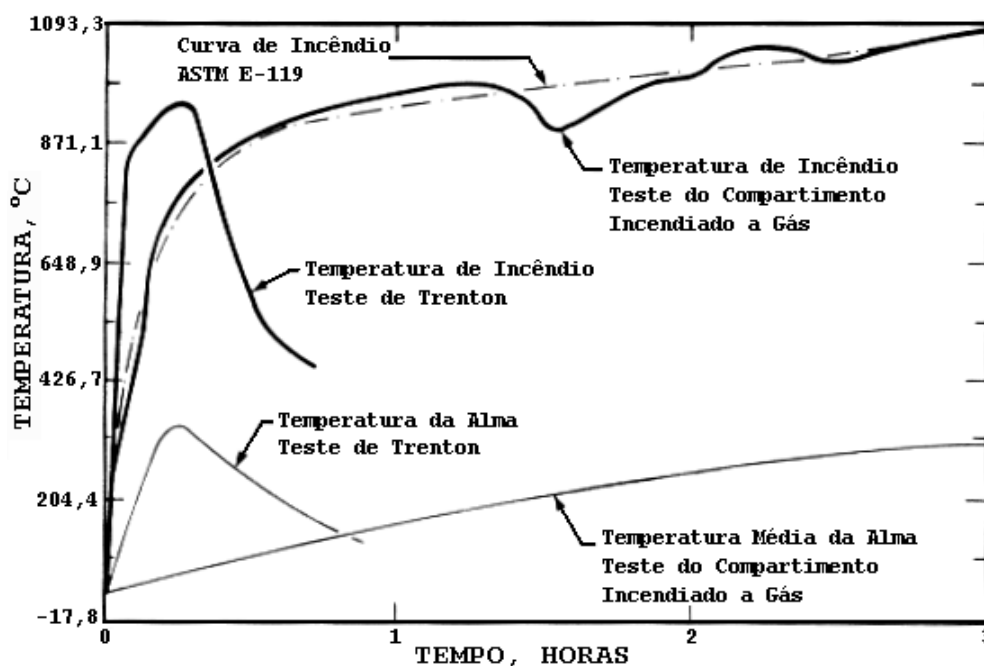


Figura 1.5: Temperaturas médias durante os testes de incêndio

Law (3), realizou um trabalho pioneiro baseado em estudos teóricos e testes em edifícios em escala natural. Mostrou que a transferência de calor às peças estruturais externas de aço depende da trajetória e da temperatura da chama, da temperatura no compartimento incendiado, da posição da peça e do seu resfriamento para a vizinhança. Estabeleceu um método de cálculo, para estimar o aumento da temperatura do aço, baseado em estudos completos em modelos e em um grande número de ensaios de incêndio, em escala natural, em edificações reais. As temperaturas calculadas do aço se ajustaram aos valores medidos em ensaios de incêndio em escala natural.

Law (3) ainda descreve os cálculos realizados para se determinar o comportamento da chama externa e do incêndio interno, dada a quantidade e o tipo de carga de incêndio, as dimensões do compartimento em incêndio e as dimensões das janelas. Admitiu também os efeitos de uma corrente de ar forçada, tal como um vento direto.

Iyengar, Baker, e Sinn (9) usaram uma abordagem da engenharia para avaliar a resistência ao incêndio e a proteção para as peças de aço expostas da Broadgate Exchange House (figura 1.6), em Londres. Avaliou-se a necessidade de proteção ao incêndio para as peças externas, ao ar livre, com base nas cargas de incêndio esperadas no edifício.

O projeto de incêndio incluiu quatro estágios. O primeiro foi determinar a natureza de um incêndio que poderia ocorrer em certa parte do edifício, levando-se em conta o tamanho e as proporções da planta dos pisos, a quantidade de material combustível no edifício, a área total da janela e o ar fornecido para o incêndio. O livre fornecimento de ar típico das condições de ventilação forçada, assim como a condição de ventilação restrita, foi revisto a fim de produzir o incêndio mais severo possível.



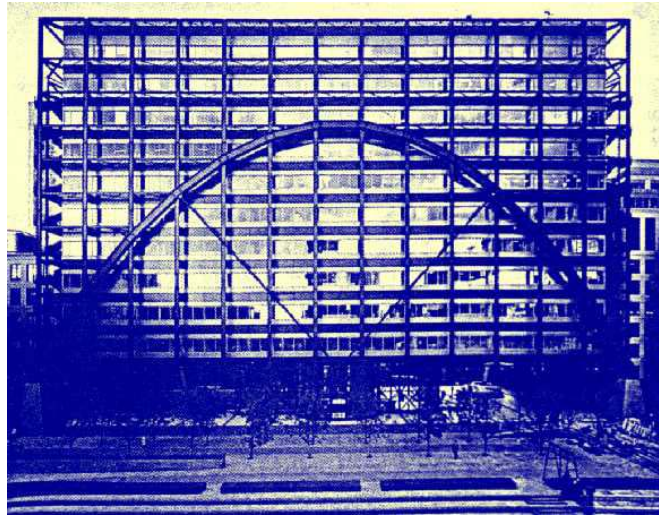


Figura 1.6: Vista de frente da Broadgate Exchange House

O segundo estágio do projeto foi relacionar os parâmetros específicos deste edifício para os testes em escala natural e de padrões estabelecidos. Através dessas relações, os perfis da temperatura e da chama de um incêndio real podem ser calculados. Além disso, realizou-se um estudo específico de probabilidade relacionando a carga de incêndio às classificações convencionais de incêndio, as quais são representadas em horas de resistência ao incêndio. Esse estágio resultou no estabelecimento de um incêndio de projeto. Usou-se uma carga de incêndio de 30kg de madeira/m<sup>2</sup>, para a ocupação do escritório, a qual causaria um incêndio equivalente a 1h e 30 min de resistência ao incêndio. Usou-se um carregamento de incêndio mais severo, de 60kg de madeira/m<sup>2</sup> para um depósito imaginário, o qual poderia estar localizado em qualquer junto à janela.

O terceiro estágio foi calcular a transferência de calor para as peças estruturais de aço e determinar a máxima temperatura do aço para o incêndio dado, baseado na teoria

clássica de transferência de calor, a qual inclui ganho de calor radiante do incêndio e da chama, perda de calor radiante para o meio ambiente e também ganho de calor convectivo dos gases quentes que cercam o aço.

Como estágio final, após as máximas temperaturas do aço serem determinadas, realizou-se uma análise de todo o sistema estrutural, com o objetivo de ilustrar a segurança estrutural e a integridade sob essas condições.

A figura 1.7 ilustra a estrutura externa da Broadgate Exchange House.

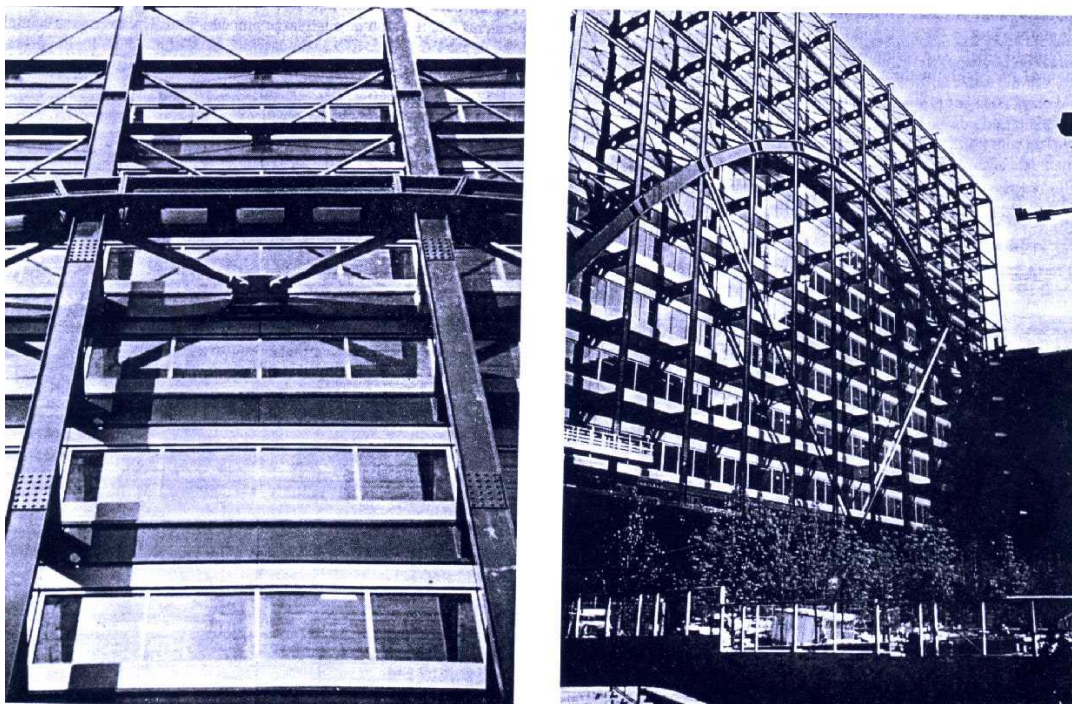


Figura 1.7: Vista da estrutura externa

Baker, Iyengar, Johnson, e Sinn (10) utilizaram as considerações e o procedimento de projeto proposto por Law (3), a fim de calcular as temperaturas das peças de aço aparentes. A partir disso, determinaram a resistência e a

estabilidade da estrutura sob condições de carregamento de incêndio, usando uma análise estrutural a alta temperatura para obter as forças e deformações na estrutura. Tais princípios foram aplicados a três edifícios na Europa: a Broadgate Exchange House e o Ludgate Place, ambos em Londres e o Hotel Arts, em Barcelona.

Para a proteção dos arcos aparentes externos da Broadgate Exchange House optou-se por uma parede cortina com duração de 1h e 30min, ao incêndio já classificado. Uma parede cortina pode ser composta por vidro e metal dentro do plano da grelha, por exemplo.

Para o Ludgate Place, os cálculos da engenharia de incêndio mostraram que um incêndio em edifício vizinho seria um caso de incêndio igualmente severo, já que o aço ficaria exposto tanto às chamas externas, quanto ao incêndio dentro do edifício vizinho. Portanto, em uma região onde o edifício vizinho ficava particularmente perto, usou-se tinta intumescente para proteger a estrutura metálica.

No Hotel Arts foram considerados diversos incêndios em diferentes locais do hotel. As autoridades locais de Barcelona exigiram que as temperaturas do aço se limitassem a 400°C. Também conduziu-se um teste para determinar se o projeto produziria temperaturas equivalentes ou menores que o exigido na classificação de duas horas. O compartimento de teste aproximou as condições típicas do quarto de hotel. Colocaram-se as seções de aço em frente ao compartimento de teste, representando as seções expostas mais leves e, por isso, as mais críticas da estrutura real. Além do mais, calibraram-se jatos de gás no compartimento para se produzir uma curva equivalente à padrão tempo-temperatura

da ISO 834 (7). O teste se manteve por três horas. As temperaturas máximas do aço registradas ficaram bem abaixo de 400°C e, de fato, muito abaixo das temperaturas calculadas usando-se as equações de engenharia de incêndio. Portanto, o teste mostrou que um incêndio real é mais crítico que um modelo de incêndio da ISO 834 (7).

Dhima, Fouquet, Joyeux, Kruppa e Zhao (11) estudaram os pilares externos do museu parisiense "Centre Georges Pompidou" (figuras 1.8 e 1.9), os quais são protegidos contra incêndio através da circulação de água em seu interior. Essa solução fornece um alto nível de proteção ao incêndio, mas sua manutenção é cara, especialmente devido ao risco de congelamento da água. Com o objetivo de modificar o tipo proteção contra incêndio dessa estrutura externa de aço, investigou-se a possibilidade do uso de tinta intumescente.

Para esse estudo específico, obedeceram-se os seguintes passos:

- A avaliação do comportamento dos pilares externos sem proteção usando o método do Eurocode 3 Part 1-2 (2);
- O projeto de um teste para condições de incêndio natural (comparado ao incêndio padrão da ISO 834 (7), um incêndio natural leva em conta os parâmetros reais, tais como carga de incêndio e fator de abertura, os quais tem uma grande influência no crescimento e na severidade do incêndio em um edifício);
- A realização de um teste de um pilar externo protegido por tinta intumescente;
- A determinação numérica da espessura necessária da tinta;

- A avaliação do comportamento do incêndio da estrutura metálica com pilares protegidos.

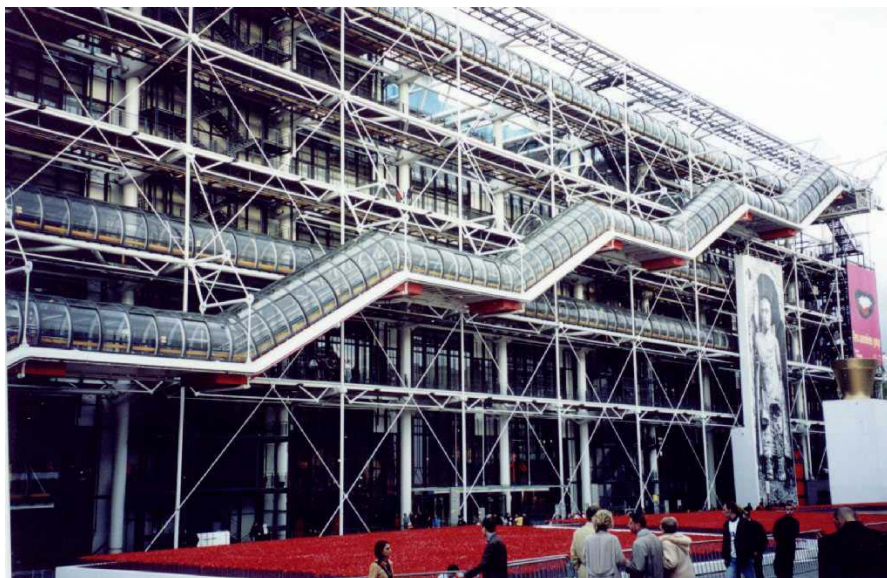


Figura 1.8: Estrutura externa do Centre Pompidou

A análise, combinando-se os resultados experimentais às simulações numéricas, provou que, mesmo com uma fina camada de tinta intumescente, pode-se obter uma adequada estabilidade ao incêndio das estruturas de aço com pilares externos densos e protegidos do "Centre Georges Pompidou".



Figura 1.9: Vista da estrutura externa do museu

Hosser, Dorn, Neumann e Siegfried (12) mostraram as possibilidades de um projeto simplificado de segurança em incêndio para as peças externas de aço, considerando-se, aqui também, um compartimento em incêndio dentro do edifício. Puderam relacionar o resultado de um incêndio real em relação a um incêndio padrão exposto à uma peça interna, através de um fator de redução. O aumento da carga última de um pilar parcialmente envolvido em chamas, comparado a um pilar totalmente envolvido, também foi definido e depende do fator de massividade do perfil de aço. Mostraram que a distribuição da temperatura na fachada de um edifício pode ser descrita através de isotermas simples.

### 1.3 SOBRE O PRESENTE TRABALHO

Neste trabalho será abordada a determinação da temperatura do aço para os elementos estruturais externos em situação de incêndio na seguinte ordem:

Capítulo 2: considerações teóricas e experimentais a respeito do comportamento das estruturas externas de aço em incêndio baseadas principalmente em Law (3), no Eurocode 3 Part 1-2 (2) e no AISI (4);

Capítulo 3: síntese do procedimento e elaboração de um fluxograma para a determinação da elevação da temperatura do aço, além da apresentação de exemplos com o objetivo de e ilustrar o procedimento apresentado.

Capítulo 4: conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Anexo: procedimento sintetizado de forma a ser utilizado profissional e academicamente como consulta breve.

Deve-se salientar que são poucos os estudos realizados sobre o comportamento das estruturas externas de aço em situação de incêndio e que não há uma norma brasileira com um procedimento específico a ser seguido para a obtenção da temperatura em tais elementos estruturais. Portanto, espera-se que a abordagem aqui apresentada contribua não somente para o trabalho de profissionais ligados à área, como também para o desenvolvimento de novas pesquisas.

## **2 COMPORTAMENTO DAS ESTRUTURAS EXTERNAS DE AÇO EM INCÊNDIO**

### 2.1 GENERALIDADES

#### 2.1.1 BASES

Este capítulo será baseado principalmente no trabalho de Law (3) e na pré-norma europeia Eurocode 3 Part 1-2 (2) e também, em menor parte, na especificação americana AISI (4).

Dadas as condições de transferência de calor para as estruturas externas de aço, pode-se calcular a temperatura que o aço atinge. O problema consiste, então, em definir tais condições de transferência de calor.

Distinguem-se as peças envolvidas e as não envolvidas em chamas. As não envolvidas em chamas recebem calor por radiação de todas as aberturas do compartimento incendiado, que estejam situadas ao seu lado, e também de todas as chamas que se projetam destas aberturas. Já para as peças envolvidas em chamas, considera-se que elas recebem calor por convecção das próprias chamas, além de receberem calor por radiação também das chamas e das aberturas pelas quais elas se projetam.



Assume-se que o compartimento incendiado esteja confinado a apenas um pavimento e que todas as suas janelas ou aberturas similares sejam retangulares.

#### 2.1.2 AÇÕES TÉRMICAS PARA PEÇAS EXTERNAS - MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

Usando este método, torna-se possível determinar as temperaturas máximas do incêndio que acontece no compartimento, o tamanho e as temperaturas das chamas provenientes das aberturas e também os parâmetros de radiação e convecção, considerando sempre regime permanente.

##### 2.1.2.1 Temperatura dos Gases em Incêndio

Primeiramente é necessário descrever o comportamento de um incêndio em um compartimento ou cômodo. Sabe-se que o incêndio passa por três estágios de desenvolvimento:

- pré-flashover, que é uma fase inicial com baixas temperaturas;
- aumento brusco da temperatura no instante em que ocorre a denominada inflamação generalizada (flashover), quando a superfície de toda a carga combustível presente no ambiente entra em ignição. O incêndio torna-se de grande proporções, tomando todo o compartimento. A temperatura dos gases eleva-se rapidamente até a extinção de todo o material combustível;

- redução gradativa da temperatura dos gases.

O AISI (4) divide o incêndio em quatro fases de desenvolvimento, ao considerar o flashover uma fase de crescimento rápido da temperatura e a inflamação generalizada o período seguinte ao flashover.

A curva da figura 2.1 ilustra o comportamento, em geral, de um incêndio que ocorre em um compartimento.

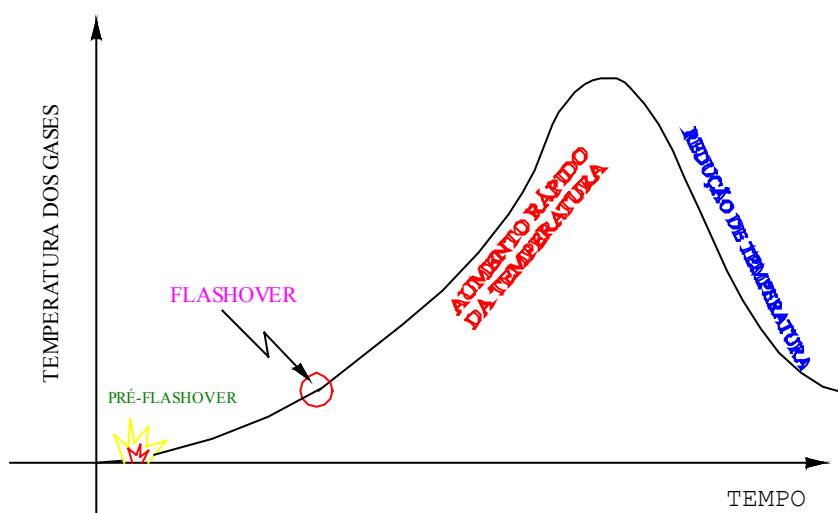


Figura 2.1: Evolução da temperatura dos gases em incêndio

Ensaio realizados em áreas compartimentadas demonstraram que a elevação da temperatura dos gases depende (13):

- da geometria do compartimento incendiado;
- das características térmicas dos materiais de vedação;
- da quantidade de material combustível;
- do grau de ventilação do ambiente.

Deve-se ressaltar que o AISI (4) considera somente a geometria do compartimento e a quantidade de material combustível como fatores determinantes da temperatura de incêndio em um compartimento.

#### 2.1.2.2 Dimensões do Compartimento e Carga de Incêndio

O compartimento em sua forma mais simples está ilustrado na figura 2.2.

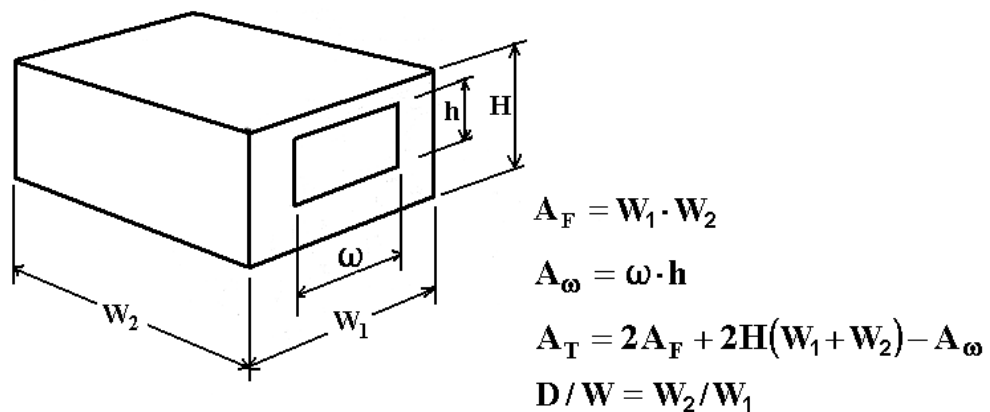


Figura 2.2: Compartimento simples de incêndio

onde:

$\omega$  = largura da janela ou soma das larguras das janelas em todas as paredes,  $[\omega] = m$ ;

$h$  = altura da janela ou média ponderada das alturas das janelas em todas as paredes,  $[h] = m$ ;

$A_\omega$  = área da janela ou soma da área das janelas em todas as paredes,  $[A_\omega] = m^2$ ;

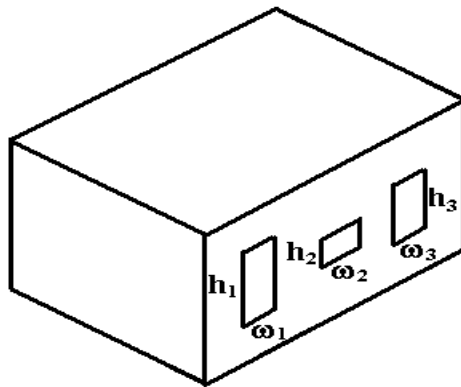
$D$  = profundidade do cômodo ou compartimento,  $[D] = m$ ;

$W$  = largura da parede, a qual contém a janela ou as janelas,  $[W] = m$ ;

$A_F$  = área de piso,  $[A_F] = m^2$ ;

$A_T$  = área total do piso, teto e paredes menos a área da janela,  $[A_T] = m^2$ .

A figura 2.3 ilustra o caso onde há mais que uma janela na parede.



$$A_1 = \omega_1 h_1 ; A_2 = \omega_2 h_2 \text{ etc.}$$

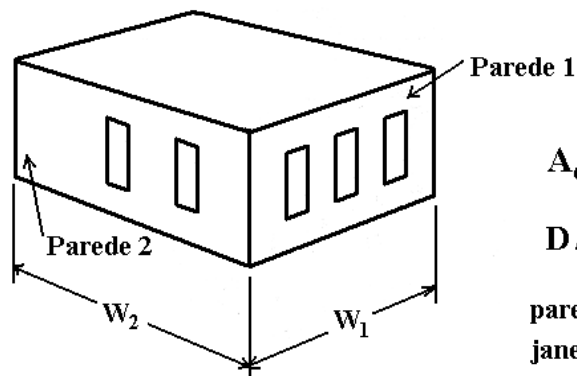
$$\omega = \omega_1 + \omega_2 + \text{etc.}$$

$$A_\omega = A_1 + A_2 + \text{etc.}$$

$$h = \frac{A_1 h_1 + A_2 h_2 + \text{etc.}}{A_\omega}$$

Figura 2.3: Compartimento com mais que uma janela

A figura 2.4 representa um compartimento com janelas em mais que uma parede.



$$A_\omega = A_{\omega_1} + A_{\omega_2} + \text{etc.}$$

$$D/W = \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{A_{\omega_1}}{A_{\omega_2}} \text{ onde a}$$

parede 1 contém a maior área de janela.

Figura 2.4: Compartimento com janelas em mais de uma parede

onde:

$A_{\omega 1}$  = área da janela na parede 1;

$A_{\omega 2}$  = área da janela na parede 2, etc.

Quando houver um núcleo no compartimento incendiado, como ilustrado na figura 2.5, o tamanho do cômodo não deverá exceder a 70m de comprimento, 18m de largura e 5m de altura, sendo que  $c_1$  e  $c_2$  são o comprimento e a largura do núcleo.

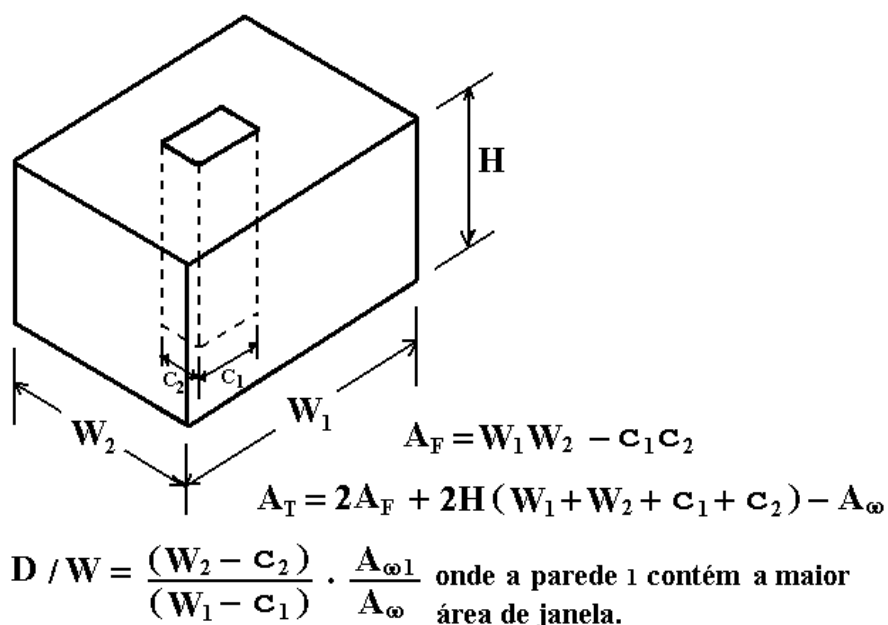


Figura 2.5: Compartimento com um núcleo

Define-se carga de incêndio como sendo todo o material combustível presente em um determinado recinto em situação de incêndio. O aspecto mais importante da carga de incêndio é a quantidade de calor liberada quando o material se queima. Ao se comparar as quantidades de calor emitidas por diferentes materiais, tornou-se conveniente convertê-las em quantidade equivalente de madeira capaz de produzir a mesma quantidade de calor durante a queima. Sendo assim, pode-se

dizer que a carga de incêndio é a carga total de madeira equivalente proveniente dos materiais combustíveis de um compartimento.

A carga total de incêndio, em kg, é dada por:

$$L = q \times A_F \quad (2.1)$$

sendo:  $q$  = densidade de carga de incêndio,  
 $[q]$  = kg de madeira equivalente/m<sup>2</sup> de piso.

### 2.1.2.3 Efeitos do Vento

#### 2.1.2.3.1 *Modo de Ventilação*

Segundo Law (3), a importância da ventilação foi quantificada por Fujita, em termos de área e altura da abertura de ventilação, a qual normalmente é a janela. Mais tarde, ainda de acordo com Law (3), em um trabalho de pesquisa realizado com o apoio do Conseil International du Batiment - Conselho Internacional de Edificação (CIB), mostrou-se como a relação de Fujita se modifica a partir dos parâmetros tamanho e forma do compartimento incendiado.

Para efeito de cálculo, devem ser usadas as condições de ventilação forçada, caso as janelas estejam em lados opostos do compartimento incendiado ou se o incêndio estiver sendo alimentado por ar suplementar, através de outra fonte, que não seja a janela. Caso contrário, utilizam-se as condições de ventilação natural para os cálculos.

### 2.1.2.3.2 Inclinação da Chama pelo Vento

A chama proveniente de uma abertura do compartimento, no qual ocorre um incêndio, pode ser projetada:

- perpendicular à fachada;
- com uma inclinação, devido ao efeito do vento, de  $+45^\circ$  e  $-45^\circ$  com a fachada, conforme a figura 2.6.

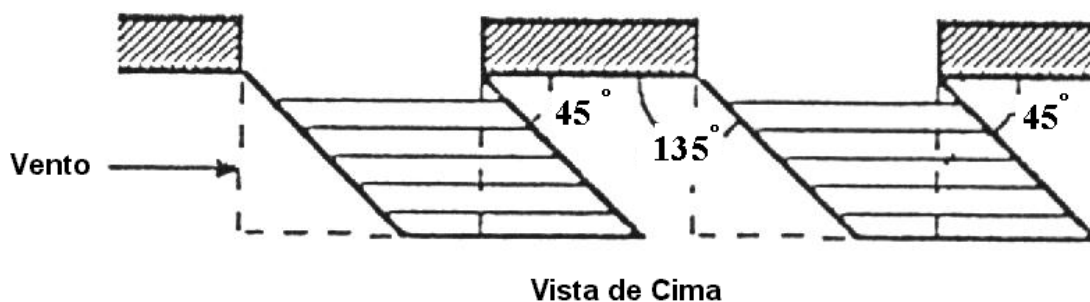


Figura 2.6: Inclinação da chama pelo vento

Havendo uma inclinação da chama pelo vento, no caso de pilares entre janelas, deve-se respeitar uma distância mínima de segurança contra incêndio entre a janela e a extremidade do pilar, conforme mostra a figura 2.7. Tal distância pode ser obtida na tabela 2.1, a qual considera um valor médio de  $50\text{kg}$  de madeira/ $\text{m}^2$  para a densidade de carga de incêndio. Essa tabela utiliza valores que servem de parâmetros para restringir a temperatura do aço a valores abaixo do crítico, que o AISI (4) considera ser de  $538^\circ\text{C}$ . Com isso, atingem-se as soluções preliminares. Caso as áreas críticas não estejam incluídas na tabela ou a carga de incêndio seja bastante diferente da assumida,

devem-se utilizar, então, os procedimentos matemáticos para a verificação da segurança contra incêndio.

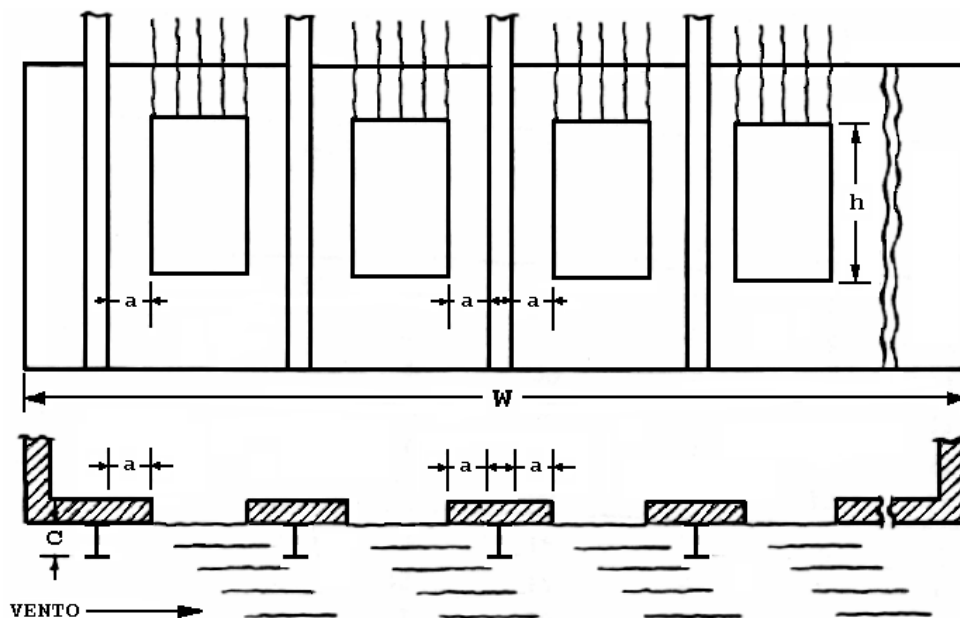


Figura 2.7: Inclinação da chama pelo vento, para pilares entre as janelas, sendo  $A = a$  ou  $A = C$ , o que for maior.

Altura da janela (h) m	Largura do compartimento (W)			
	9,1m	18,3m	36,6m	73,2m
	A (m)			
0,9	1,5	2,6	2,6	2,6
1,2	0,9	1,2	1,4	1,4
1,5	0,9	1,2	1,2	1,2
1,8	0,8	1,1	1,1	1,1
2,7	0,6	0,8	0,9	0,9
3,7	0,5	0,6	0,9	0,9
4,6	0,5	0,6	0,8	0,8

Tabela 2.1: Distância mínima de segurança contra incêndio entre a janela e a extremidade do pilar, considerando-se pilares entre as janelas



#### 2.1.2.4 Características do Incêndio e da Chama

##### 2.1.2.4.1 *Estudos Experimentais da Projeção Externa da Chama*

O primeiro estudo completo de projeção das chamas pelas janelas, segundo Law (3), foi feito por Yokoi, que queria estimar o risco de propagação vertical de um incêndio. Para isto, ele realizou uma experiência onde, a partir da queima de álcool em bandejas retangulares, foram obtidas as relações de distribuição da temperatura e da velocidade em colunas de fumaça provenientes dos gases quentes da queima. Ao tratar a metade superior de uma janela como a fonte de calor retangular, ele relacionou similarmente as colunas de fumaça, que saem de janelas de diversos tamanhos e formas, em um cômodo modelo com ( 40 x 40 x 20 )cm, contendo incêndio alimentado a álcool. A partir daí, foi possível demonstrar os efeitos de uma parede acima da janela, o efeito do formato da janela na distribuição da temperatura e na trajetória da coluna de fumaça. Ainda segundo Law (3), Yokoi indicou o formato da janela por  $n = \omega / h/2$ , ou seja, a taxa da largura pela altura da metade superior da janela. Além disso, ele determinou uma série de formatos de colunas de fumaça para diferentes valores de n. Segundo Law (3), Yokoi obteve um resultado satisfatório entre os testes realizados a partir de seu modelo e quatro ensaios usando combustível de madeira em edificações de concreto em escala natural. Mas, mesmo assim, como ele próprio mostra, teoricamente é necessário fazer um ajuste para a emissividade das chamas provenientes da queima da madeira e para as propriedades térmicas da parede acima da janela. Ele também comenta que, onde há ventilação restrita no

compartimento, o fluxo de gás continua a queimar-se, mesmo depois que ele deixa o cômodo, o que afeta a relação.

De acordo com Law (3), Webster et al. realizaram uma série de testes, a maioria em modelo em escala reduzida, utilizando cômodos cúbicos abertos em um lado, contendo incêndio com carga de madeira. Mediram-se as alturas alcançadas pela chama. Law (3) também comentou que Thomas relatou esses resultados através de uma análise bidimensional, essencialmente a mesma usada por Yokoi. Ao especificar uma temperatura de topo da chama de aproximadamente 538°C, pode-se obter um bom ajuste entre esses dados e os de Yokoi.

Seigel (5) realizou testes nos Laboratórios Underwriters, utilizando um compartimento em escala natural, com janelas de vários tamanhos e formas, contendo incêndio com carga de madeira. Para a maioria dos ensaios, colocou-se ar suplementar dentro do cômodo a fim de fornecer o efeito de aumento da taxa de queima da madeira a uma condição de "bem ventilado" (queima-livre). Registrou-se a altura e a projeção da chama, assim também como a distribuição da temperatura no topo da chama emergente. A relação de Seigel (5) trata as chamas como jatos horizontais forçados, cuja temperatura de topo é definida a um valor de 538°C.

Deve-se ressaltar que esses valores de temperatura apresentados são aproximados. Uma prova disto seria que, em vários testes realizados em Borehamwood, em um cômodo em escala natural, contendo incêndio com carga de madeira, o topo da chama foi registrado, mas apenas como um produto secundário do principal ensaio.

A maioria dos ensaios em escala natural, realizados especificamente para estudar a projeção da chama, tem pelo menos dois aspectos importantes: em primeiro lugar, demonstra-se a validade das relações obtidas ao se usar os modelos de teste; em segundo lugar, consegue-se ilustrar a diferença entre o ambiente de laboratório idealizado e as condições "naturais". Assim, observou-se que, na prática, a projeção das chamas pelas janelas pode ser assimétrica. A figura 2.8 ilustra os principais parâmetros de interesse para a projeção da chama.

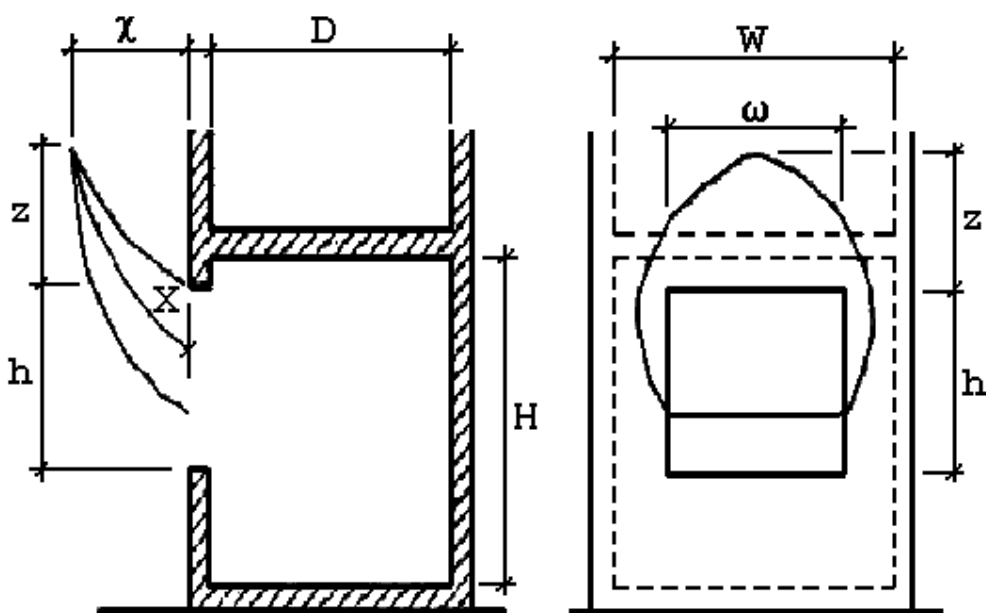


Figura 2.8: Dimensões usadas nos cálculos da projeção da chama

#### 2.1.2.4.2 Perfil da Temperatura na Fachada de um Edifício

Hosser, Dorn, Neumann e Siegfried (12) apresentam quatro regiões distintas, na fachada de um edifício, conforme a figura 2.9, com relação à temperatura e às chamas:

1. A região acima da abertura, onde as chamas sobem na vertical;
2. Os dois terços superiores da abertura por onde saem as chamas na horizontal, provenientes do compartimento incendiado;
3. O um terço inferior da abertura, por onde circula o ar frio;
4. A região abaixo da abertura que permanece fria.

A velocidade média do gás quente proveniente do compartimento incendiado é calculada da seguinte forma:

$$V_m = \frac{2}{3} \phi \sqrt{2g \frac{2}{3} h \left( \frac{\rho_{ar}}{\rho_z} - 1 \right)} \quad (2.2)$$

onde:

$V_m$  = velocidade média do gás,  $[V_m] = \text{m/s}$

$\rho_{ar}$  = densidade do ar na região =  $1,2 \text{kg/m}^3$

$\rho_z$  = densidade do gás queimado =  $0,3$  até  $0,5 \text{kg/m}^3$

$g$  = aceleração da gravidade =  $9,81 \text{m/s}^2$

$\phi$  = fator de perda =  $0,7$

$h$  = altura da janela,  $[h] = \text{m}$

Entre as regiões 2 e 3 da figura 2.9 localiza-se o "plano neutro", o qual separa o ar frio que entra e o gás quente que sai da abertura. Isso é de importância para as peças de aço submetidas a incêndio.

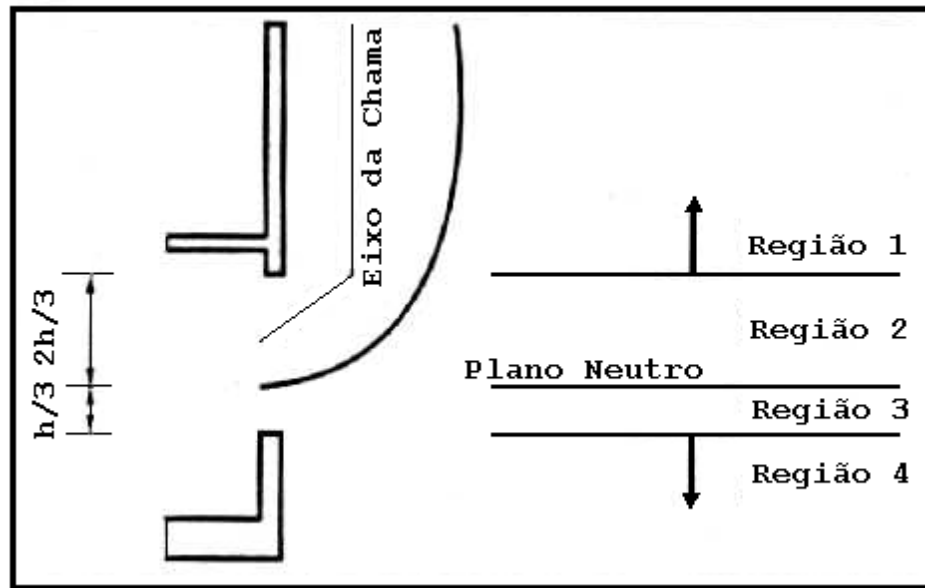


Figura 2.9: Demarcação das regiões em frente ao edifício

As temperaturas e a velocidade da corrente do gás quente, assim também como sua quantidade, pouco se modificam desde o momento de sua saída através da abertura até a curva para a via vertical.

O fluxo de massa  $M$  [kg/s], na região superior do topo da abertura, é calculada da seguinte forma:

$$M = \omega \cdot \frac{2}{3} \cdot h \cdot V_m \cdot \rho_z \quad (2.3)$$

Substituindo a equação 2.2 na equação 2.3, tem-se a equação 2.4.

$$M = \left(\frac{2}{3}\right)^{5/2} \cdot \omega \cdot h^{3/2} \cdot \rho_z \cdot \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \left(\frac{\rho_{ar}}{\rho_z} - 1\right)} \quad (2.4)$$

Substituindo-se o valor de  $\rho_z = 0,5 \text{ kg/m}^3$  na equação 2.4, encontra-se o seguinte resultado:

$$M = 0,66 \cdot \omega \cdot h^{3/2} \quad (2.5)$$

Já para o valor de  $\rho_z = 0,3\text{kg/m}^3$ , a equação 2.4 se transforma em:

$$M = 0,58 \cdot \omega \cdot h^{3/2} \quad (2.6)$$

O fluxo de massa acima da abertura se expande proporcionalmente ao fluxo da corrente de gás quente, o qual tem a largura de seus lados e a sua profundidade diminuída linearmente com o ângulo  $\beta$ , conforme mostra a figura 2.10.

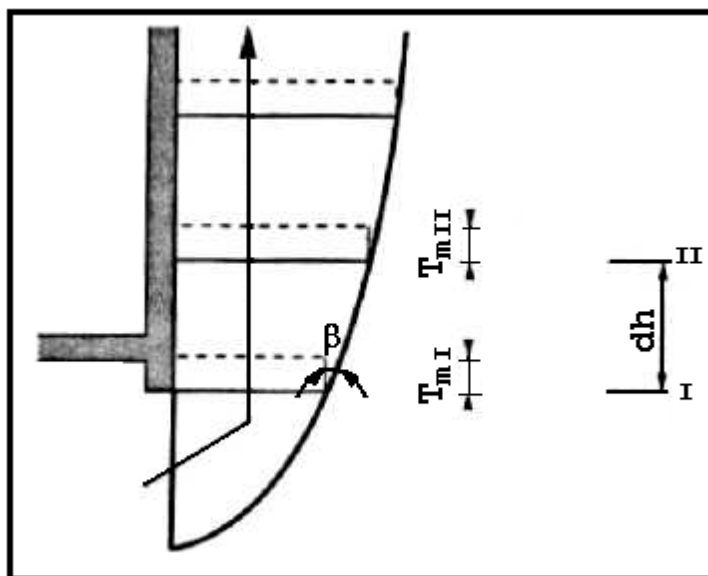


Figura 2.10: Temperaturas médias no fluxo de gás quente, na fachada do edifício, a diferentes alturas

Pode-se averiguar a temperatura média,  $T_{mII}$  [°C] em uma altura II, em relação ao comportamento da altura I (parte superior da janela), de acordo com a figura 2.10.

$$T_{mII} = \frac{M_I \cdot T_{mI} \cdot c_I}{M_{II} \cdot c_{II}}$$

$$= \frac{\omega \cdot h \cdot T_{mI} \cdot c_I}{(\omega + 2 \cdot \Delta h \cdot \tan \beta) \cdot (h + \Delta h \cdot \tan \beta) \cdot c_{II}} \quad (2.7)$$

onde:

$c_i$  = calor específico na região  $i$ ,  $[c_i] = J/(kg^\circ C)$ ;

$$\beta = 2,8 \cdot \frac{2200 + T_{mI}}{T_{mI}};$$

$T_{max}$  é a temperatura máxima no eixo do gás quente para cada valor de altura. Essa temperatura é representada pela equação a seguir (despreza-se, aqui, o índice  $i$ ):

$$T_{max} = \frac{T_m - 134}{0,75} \quad (2.8)$$

Para a averiguação da distribuição da temperatura na horizontal, considerando-se uma determinada altura, são adotadas as seguintes condições de contorno:

- os dois terços superiores da abertura do compartimento, por onde as chamas se emergem, são admitidos por:  $2h/3$ ;
- a distância horizontal da parede do compartimento ao eixo da chama é igual a:  $h/3$ ;
- as temperaturas, entre o eixo da chama e a parede, são consideradas com valores aproximados.

O curso da temperatura, que forma um ângulo reto com a parede, entre o eixo da chama e a isoterma a 538°C, na região de medida  $h/3$ , segue a função:

$$T = T_{\max} \cdot e^{-\Omega_1 y^2} \quad (2.9)$$

onde:

$$\Omega_1 = -\ln\left(\frac{538}{T_{\max}}\right) \cdot \frac{9}{h^2}$$

Na região paralela à parede frontal, tem-se validade análoga para o caso anterior, porém utilizando-se  $\omega/2$ :

$$T = T_{\max} \cdot e^{-\Omega_2 x^2} \quad (2.10)$$

onde:

$$\Omega_2 = -\ln\left(\frac{538}{T_{\max}}\right) \cdot \frac{4}{\omega^2}$$

Pode-se, então, segundo apresentado por Hosser, Dorn, Neumann e Siegfried (12), calcular a distribuição da temperatura da chama em um raio horizontal para uma determinada altura, conforme representa a figura 2.11.



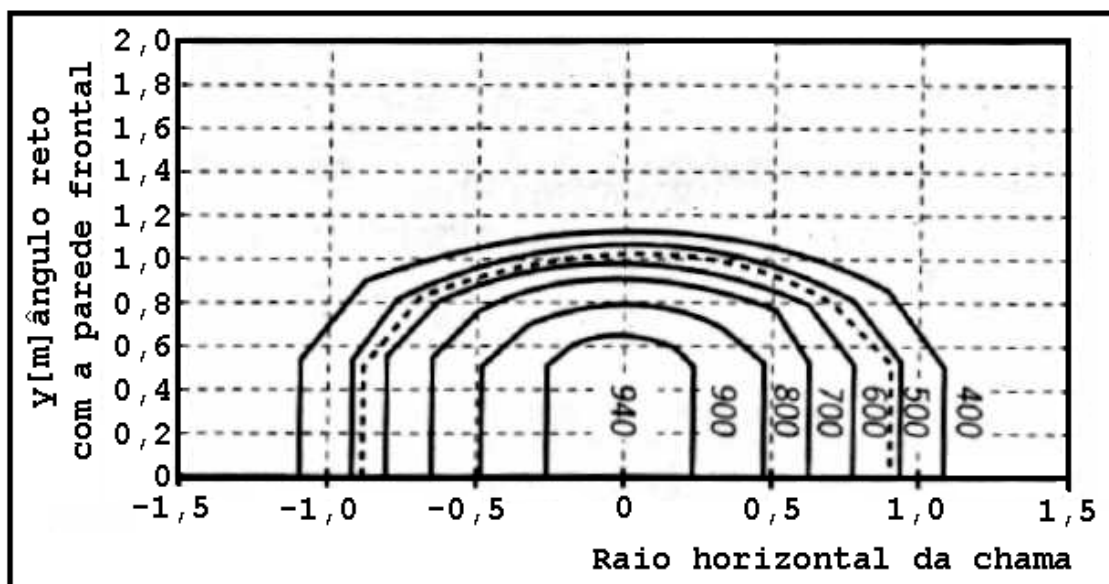


Figura 2.11: Representação das isotermas, para uma altura específica, do teste 1 de uma série de testes de incêndio, realizados em Lehrte

De acordo com Hosser Dorn, Neumann e Siegfried (12), o teste de incêndio de Lehrte mostrou que o vento não tem uma influência considerável, durante o incêndio, na fachada do edifício. Resultam-se dois casos de temperatura para a estrutura externa, dependendo de sua posição em relação à abertura do compartimento:

- para as estruturas envolvidas em chamas, as temperaturas são medidas de acordo com o tipo de ventilação;
- para a peça que se encontra próxima à janela, deve-se levar em conta a influência da ventilação da corrente de ar quente. Aqui seguem-se aceitações simplificadas:
  - a ventilação forçada, paralela à fachada, tem uma velocidade de 2m/s;
  - esse vento inclina lateralmente o eixo da chama a um ângulo de 24°;

- ventos com velocidades altas causam efeito a curto prazo e não são consideráveis;
- uma deformação da chama é desprezível; a inclinação do eixo causa uma transferência lateral nos campos de temperatura, considerando-se uma determinada altura, através da fórmula  $\Delta h \cdot \tan 24^\circ$ .

#### 2.1.2.4.3 *Ventilação Natural*

Em um incêndio o processo de combustão dos materiais consome oxigênio do ar, ou seja, depende da existência de ar para alimentar a queima dos combustíveis.

Os ensaios realizados sob condições de ar estacionário ou de vento fraco têm o fluxo de ar controlado pelo comportamento do incêndio e pelas dimensões do compartimento. Nessas condições, o fluxo de ar é denominado "sem ventilação forçada" ou "ventilação natural".

##### 2.1.2.4.3.1 *Taxa de queima*

Testes realizados mostram que a taxa de queima é aproximadamente constante no período de inflamação generalizada, quando a carga cai de 80% para 30% de seu valor inicial. Essa taxa é definida como a taxa média de queima,  $R$ , cuja unidade é kg/s:

$$R = \frac{L}{t} \quad (2.11)$$

onde:

L = carga de incêndio;

t = tempo de duração do incêndio

Com ampla ventilação - condição de queima-livre - o valor de t passa a ser chamado  $t_F$  e é determinado pelas características da carga de incêndio. Quanto maior a relação da área pelo volume do material combustível exposto ao incêndio, mais rapidamente acontecerá a queima deste material, dando um menor valor de duração do incêndio à queima-livre,  $t_F$ . Então, para qualquer tipo dado de combustível, R é diretamente proporcional a L e é dado por:

$$R = \frac{L}{t_F} \quad (2.12)$$

Diz-se ainda que, para a maioria dos tipos de móveis encontrados em edifícios, o valor de  $t_F$  é cerca de 1200 segundos, resultando na equação a seguir:

$$R = \frac{L}{1200} \quad (2.13)$$

Quando a ventilação é restrita, há limites diferentes para o valor de R. Ao considerar o fluxo de ar e o equilíbrio térmico (como por exemplo, o calor perdido através das janelas, o calor perdido para as superfícies ao redor do compartimento, o calor usado para aumentar a temperatura do combustível remanescente), alguns parâmetros devem ser

incluídos. Considera-se que os parâmetros importantes sejam a área e a altura das janelas, respectivamente  $A_w$  e  $h$ , a área das superfícies fechadas (excluindo-se as janelas),  $A_T$ , para as quais o calor é perdido e a razão entre a profundidade  $D$  e a largura  $W$  do compartimento. Levando-se em conta os parâmetros aqui citados e utilizando-se de compartimentos com 50cm, 100cm e 150cm de altura, ensaios em escala natural foram realizados em Borehamwood, Metz e Carteret, com o apoio do CIB. Segundo Law (3), na figura 2.12, tem-se, traçada por Thomas, a curva que representa a equação 2.15. Tal curva tem inclinação correspondente à inclinação da curva obtida nos ensaios laboratoriais.

Conforme Law (3), para admitir as dimensões  $D$ ,  $W$  e  $A_T$  do compartimento, Thomas apresenta a seguinte equação:

$$R = 0,0885A_w h^{0,5} \quad (2.14)$$

Os valores de taxa de queima,  $R$ , utilizados na figura 2.12 foram medidos em situação de ventilação restrita em escala natural. A curva apresentada representa a equação 2.15, a qual foi traçada por Thomas, de acordo com Law (3):

$$R = \left[ 0,18 \left( 1 - e^{-0,036\eta} \right) A_w \left( h \frac{W}{D} \right)^{1/2} \right] \quad (2.15)$$

onde:

$$\eta = \frac{A_T}{A_w h^{1/2}}$$

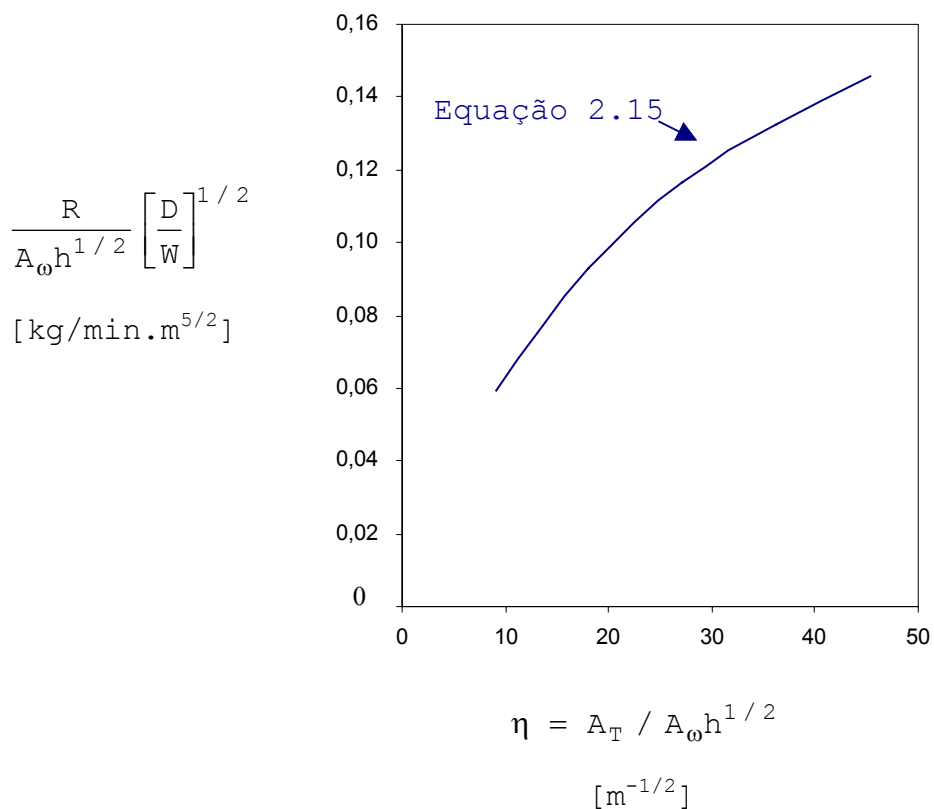


Figura 2.12: Variação de  $R / A_{\omega} h^{1/2}$  com o tamanho do compartimento e a ventilação, como dado por Thomas através dos dados do CIB.

Para uma dada carga de incêndio e tamanho de compartimento, o cálculo de R deve ser feito tanto pela equação 2.12 quanto pela equação 2.15. Se esta última apresentar um resultado de menor valor, significa que há a condição de ventilação controlada.

#### 2.1.2.4.3.2 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

A temperatura dentro do compartimento incendiado atinge um valor máximo, que depende da carga de incêndio e das dimensões do compartimento. Segundo Law (3), Thomas fornece

a relação das medidas do CIB sobre a temperatura média de um incêndio,  $T_f$ , no período de inflamação generalizada, como função de  $\eta$ , como mostrado na figura 2.13. O ponto de maior interesse, mostrado na figura, é aquele onde  $T_f$  cresce a um máximo de  $\eta$  entre aproximadamente 9 e  $18\text{m}^{-1/2}$  e aí então ele declina. O valor de  $T_f$  também depende da carga de incêndio, o que está claro na figura 2.13, onde os resultados para testes em escala natural com baixas densidades de carga de incêndio, ficam bem abaixo da curva de Thomas, de acordo com Law (3). Assume-se que há um "limite superior" ou um máximo valor de  $T_f$  para um dado valor de  $\eta$ . A equação 2.16, a qual é traçada na figura 2.13, é proposta:

$$T_f(\text{máx}) = 6000 \frac{(1 - e^{-0,1\eta})}{\eta^{1/2}} + T_a \quad (2.16)$$

onde:

$T_f$  é a temperatura de incêndio,  $[T_f] = ^\circ\text{C}$ .

$T_a$  é a temperatura inicial;  $T_a = 20^\circ\text{C}$ .

Para baixos valores de carga de incêndio, o limite superior não é atingido e, ao examinar os dados apresentados, conclui-se que este efeito não é simplesmente devido à densidade da carga de incêndio, mas também devido à carga de incêndio em relação à ventilação e às dimensões do compartimento.

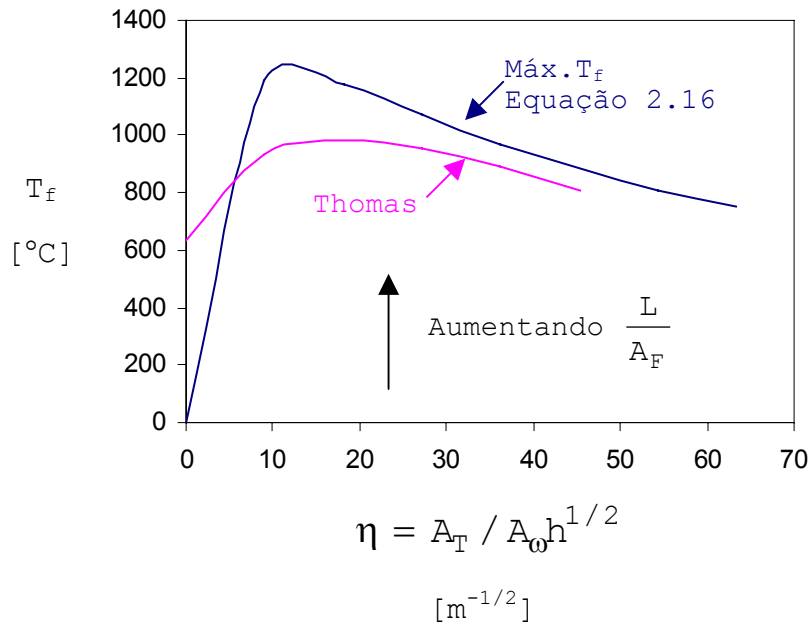


Figura 2.13: Variação da temperatura média de um incêndio com o tamanho do compartimento e a área da janela, considerando ventilação natural.

Análises primitivas tanto dos dados do CIB quanto dos dados em escala natural mostraram que  $\Psi = L / (A_{\omega} A_T)^{1/2}$  é um parâmetro importante, que está relacionado a uma resistência equivalente de incêndio. Ele foi usado para modificar a equação 2.17 no caso do valor máximo como a seguir:

$$\frac{T_f - T_a}{T_f(\text{máx}) - T_a} = 1 - e^{-0,05\Psi} \quad (2.17)$$

A equação 2.17 encontra-se representada pela curva da figura 2.14.

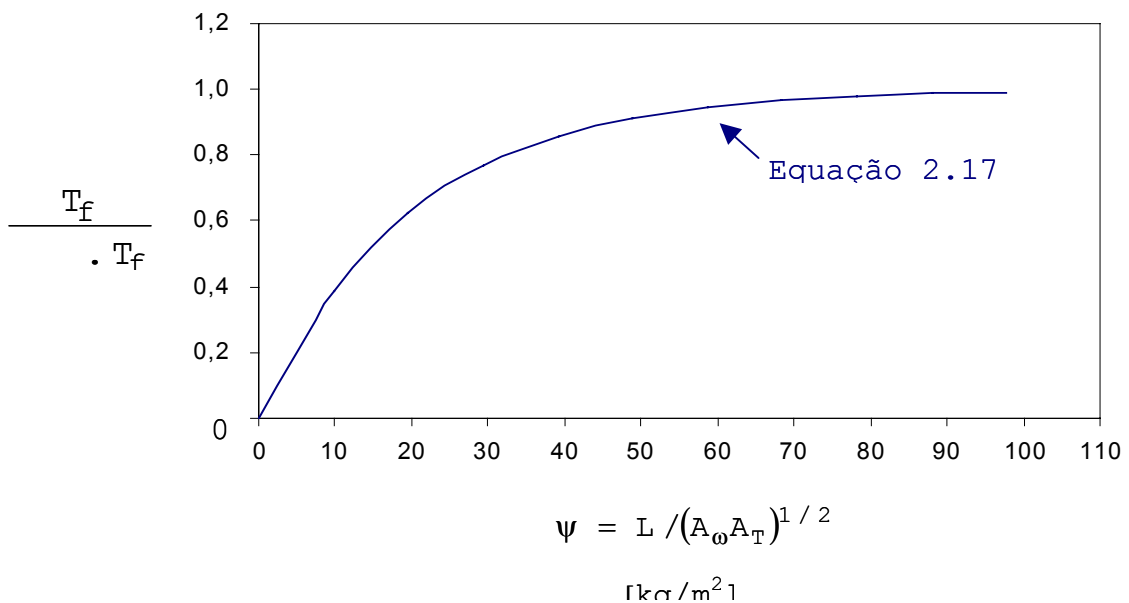


Figura 2.14: Variação da temperatura média de um incêndio com a carga de incêndio, o tamanho do compartimento e a área da janela, considerando ventilação natural.

Ao combinar as equações 2.16 e 2.17, chega-se a uma equação, a qual representa a temperatura de incêndio para a situação de ventilação natural:

$$T_f = 6000 \frac{(1 - e^{-0,1\eta})}{\eta^{1/2}} (1 - e^{-0,05\Psi}) + T_a \quad (2.18)$$

#### 2.1.2.4.3.3 Altura da Chama

Conforme Law (3), Yokoi estudou a altura da chama e determinou a relação  $y/r_o$ , onde  $y$  é a altura acima do topo da janela e  $r_o$  é o raio efetivo da metade superior da



janela, sendo  $\theta_T$  um termo adimensional que envolve a temperatura e o regime de fornecimento de calor. Com esta relação, obteve-se uma família de curvas para diferentes valores de  $n$ , que é a razão entre a largura e a altura da metade superior da janela. Segundo Law (3), Thomas mostrou que essas curvas poderiam ser colocadas todas juntas através da relação de  $n^{1/3}y$  e  $\theta_T$ .

De acordo com Law (3), ela própria e Thomas analisaram os dados de Yokoi, Webster et al. e Seigel sugerindo, então, a seguinte relação:

$$\frac{n^{1/3}(z+h)}{r_o} = \frac{2}{\theta_T} \quad (2.19)$$

sendo:

$(z+h)$  = altura do topo da chama acima da base da janela de altura  $h$ , assumindo-se a temperatura no topo igual a  $538^\circ\text{C}$ ,  $[(z+h)] = \text{m}$ ;

$n = 2\omega/h$ , um termo adimensional;

$r_o = 0,55(A_\omega 2\pi)^{1/2}$ ,  $[r_o] = \text{m}$ ;

$$\theta_T = (T_z - T_a) \left[ \frac{r_o^5 c_z^2 \alpha_z^2 y}{R^2 C^2 T_a} \right]^{1/3} .$$

onde:

$\theta_T$  = temperatura adimensional da chama;

$c_z$  = calor específico da chama,  $[c_z] = \text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$ ;

$\alpha_z$  = coeficiente de convecção da chama,  $[\alpha_z] = \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$C$  = poder calorífico da carga de incêndio,  $[C] = \text{kJ}/\text{kg}$ .

Rearranjando-se a equação 2.19, ela poderá ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{z + h}{h} = 2\pi^{1/3} \left[ \frac{R}{A_{\omega} \rho_z (gh)^{1/2}} \right]^{2/3} \left[ \frac{C^2 T_a}{c_z^2 (T_z - T_a)^3} \right]^{1/3} \quad (2.20)$$

ou

$$\frac{z + h}{h} = 23,5 \left[ \frac{R}{A_{\omega} \rho_z (gh)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (2.21)$$

onde:

$$C = 1,6 \times 10^4 \text{ kJ/kg};$$

$$c_z = 0,31 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)};$$

$$T_a = 20^\circ\text{C};$$

$$\rho_z = \text{a densidade do gás quente, } [\rho_z] = \text{kg/m}^3;$$

$$g = \text{aceleração da gravidade, } [g] = \text{m/s}^2.$$

A figura 2.15 ilustra os parâmetros utilizados não somente no cálculo da altura, mas também das demais dimensões da chama.

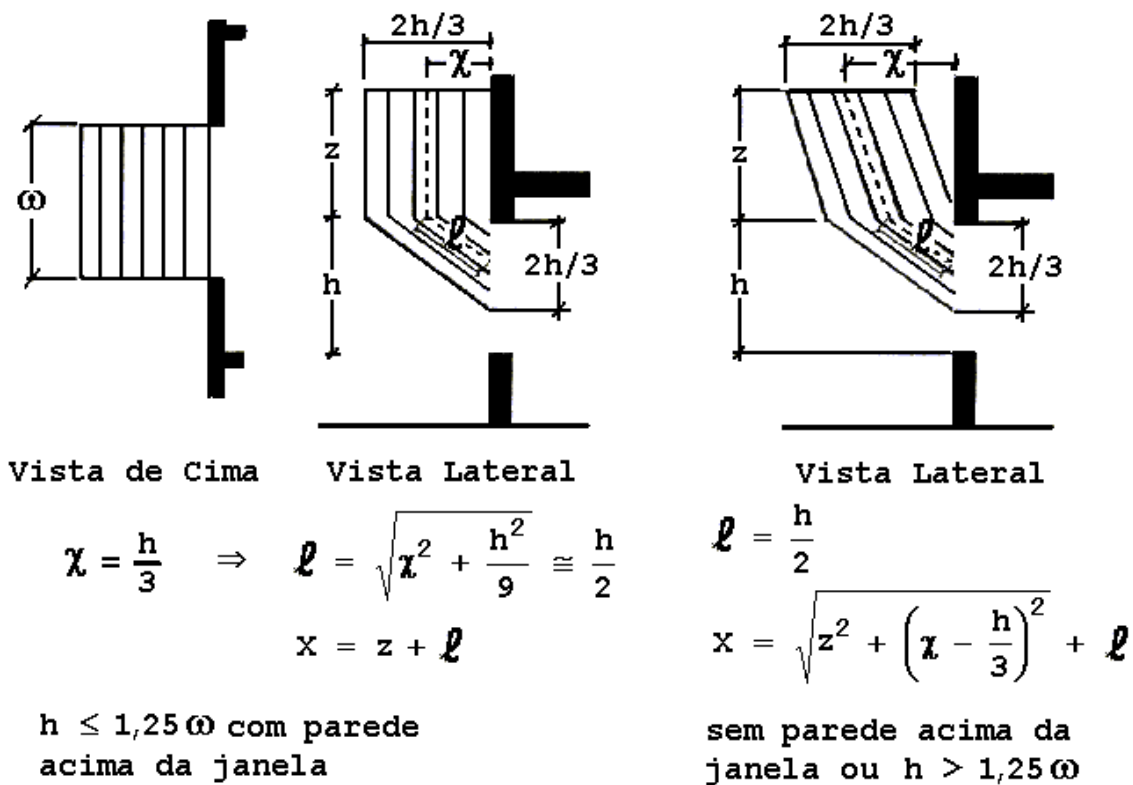


Figura 2.15: Dimensões da chama para ventilação natural

Os resultados dos ensaios para a determinação da altura da chama, considerando-se ventilação natural e tendo os testes sido realizados em escala natural, estão marcados na figura 2.16. Observa-se que a equação 2.21, proposta por Law (3), e também por Thomas, superestima os valores para altura da chama.

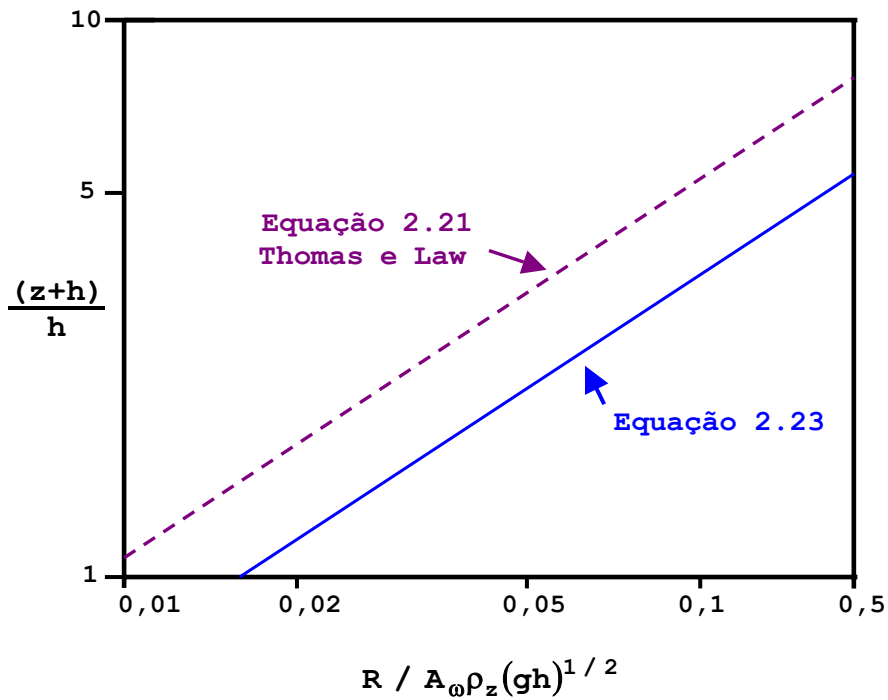


Figura 2.16: Alturas das chamas em testes em escala natural com ventilação natural

Após estudos realizados, chegou-se à conclusão que o termo  $R / [A_{\omega} \rho_z (gh)^{1/2}]$  é altamente significativo, enquanto que  $n$  é pouco significativo. Pôde-se, então, obter a seguinte equação:

$$\frac{z+h}{h} = 8,9 \left[ \frac{R}{A_{\omega} \rho_z (gh)^{1/2}} \right]^{0,51} n^{0,12} \quad (2.22)$$

Durante os testes laboratoriais para obtenção das alturas da chama, foram colhidos dados bastante difusos. Acredita-se que essa difusão seja, provavelmente, aleatória e que a influência de  $n$  seja pequena. Sendo assim, parece não fazer sentido, para efeito de cálculo, partir da equação geral 2.21, mas sim usar um coeficiente de ajuste. Logo, a

relação recomendada para cálculo da altura da chama passa a ser:

$$\frac{z + h}{h} = 16 \left[ \frac{R}{A_{\omega} \rho_z (gh)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (2.23)$$

que também pode ser escrita da seguinte forma:

$$z + h = 12,8 \left[ \frac{R}{\omega} \right]^{2/3} \quad (2.24)$$

onde:

$$\rho_z = 0,45 \text{Kg/m}^3 \text{ a } 538^{\circ}\text{C}.$$

Se um toldo ou sacada (com projeção horizontal  $h_a$ ), conforme a figura 2.17, estiver localizado no nível do topo da janela em sua largura total, a altura da chama,  $z$ , dada pela fórmula 2.24, deve ser modificada como a seguir:

- considerando parede acima da janela e  $h \leq 1,25\omega$ ,  $z$  é diminuída por  $h_a \sqrt{2}$ ;
- sem parede acima da janela, ou quando houver a situação  $h > 1,25\omega$ ,  $z$  é diminuída por  $h_a$ .

A figura 2.17 ilustra a inclinação da chama devido à existência de uma sacada.

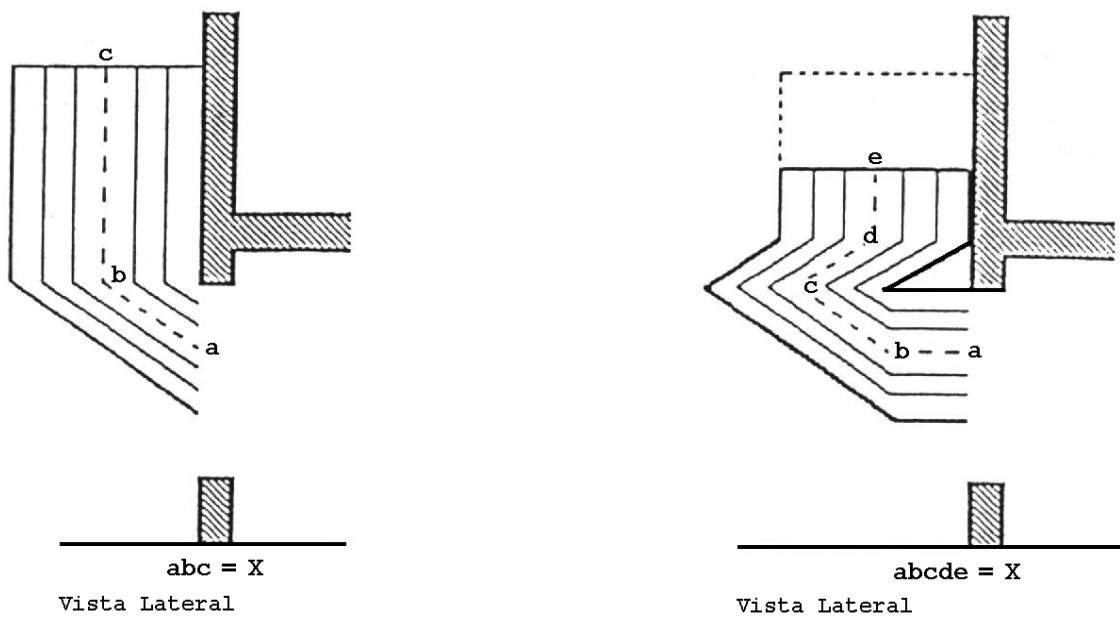


Figura 2.17: Inclinação da chama por uma sacada

#### 2.1.2.4.3.4 *Largura e Profundidade da Chama*

Ao estudar o comportamento de uma chama, a qual emerge através de uma janela, observou-se que a largura máxima desta chama não apresenta valores apreciavelmente maiores que a largura da janela. Logo, considera-se que a largura da chama seja a largura da própria janela, como ilustrado na figura 2.15.

As chamas tendem a se emergir acima dos dois terços superiores de uma janela, pois abaixo deste "plano neutro", o ar frio penetra no compartimento incendiado. Portanto, conforme a figura 2.15, a profundidade da chama é  $2/3$  da altura da janela:  $2h/3$ .

#### 2.1.2.4.3.5 *Projeção Horizontal da Chama*

A distância horizontal do topo da chama até a fachada, depende do formato da janela e se há ou não parede acima da janela. Tal parede é definida pelo AISI (4) como sendo uma superfície vertical, a qual mantém sua integridade ao exceder o valor de  $K = 2z/3$  em altura, onde  $z$  é a altura da chama.

De acordo com o AISI (4), uma chama somente será projetada para fora da fachada se houver a possibilidade de passagem de ar por ela. Em situações onde há uma janela estreita ou um grande número de janelas sem parede acima delas, o ar pode se movimentar mais facilmente por detrás da chama, portanto inclinando-a para fora. Inversamente, com uma janela larga ou um grande número de janelas, havendo parede acima delas, a chama ou as chamas permanecerão perto da fachada.

A partir de uma análise de regressão linear para a projeção  $\chi$  do topo da chama, Law (3) chegou à equação a seguir:

$$\frac{\chi}{h} = \frac{0,454}{n^{0,53}} \quad (2.25)$$

sendo  $n$  um termo muito pouco significativo e o termo  $R / [A_0 \rho_z (gh)^{1/2}]$  não significativo. A equação 2.25 está representada na figura 2.18. Segundo Law (3), como mostrado por Yokoi, a curva da figura 2.18 mostra que a projeção do topo da chama decresce com  $n$  e ela é menos que a metade da altura da janela para valores de  $n$  que excedem a unidade, o

que inclui a maioria das situações. A equação 2.25 é a relação recomendada para  $\chi$ , desde que haja uma parede acima da janela. Mas, ainda havendo parede acima da janela, pode-se ter outros dois casos distintos:

- para  $h \leq 1,25\omega$ :

$$\chi = h / 3 \quad (2.26)$$

Para o caso anterior, o AISI (4) comenta que, se houver um grande número de janelas em uma parede, as chamadas naturalmente estarão próximas à fachada. É possível, portanto, que possa haver uma janela estreita isolada, a qual fornece uma maior projeção horizontal. Se ela estiver localizada longe das outras janelas, a uma distância maior que quatro vezes sua própria largura, então ela será considerada como uma janela individual.

- para  $h > 1,25\omega$  e a distância a qualquer outra janela  $> 4\omega$ :

$$\chi = 0,3h(h / \omega)^{0,54} \quad (2.27)$$

Para a equação 2.27, o AISI (4) também observa que o valor do termo  $h$  deve ser o valor individual e não o valor ponderado.

Pode-se concluir, então, que a equação 2.25 deve ser usada para os outros casos quaisquer, fora aqueles onde aplicam-se as equações 2.26 e 2.27, onde exista parede acima da janela.



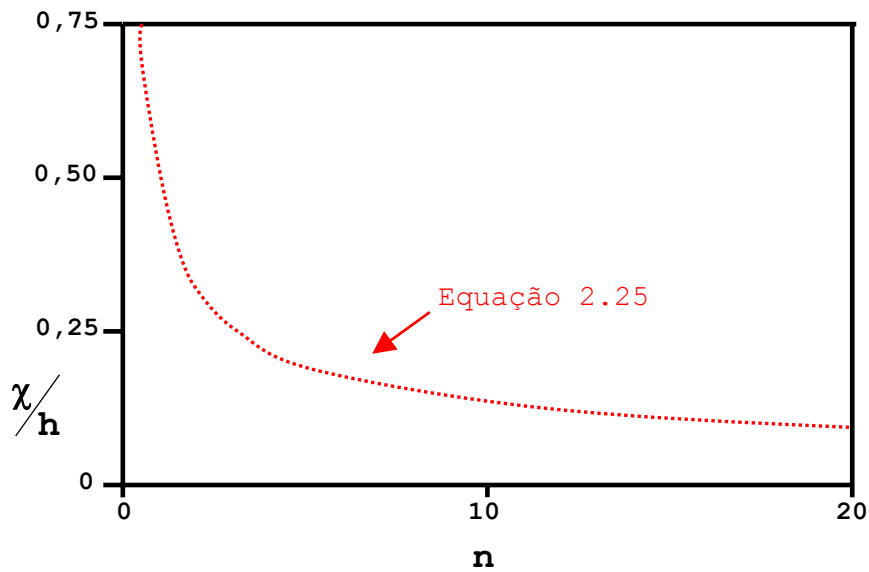


Figura 2.18: Projeção horizontal do topo da chama para testes em escala natural com ventilação natural, considerando parede acima da janela.

Segundo Law (3), Yokoi mostrou que sem uma parede acima da janela, o valor de  $\chi$  seria independente de  $n$ . Na ausência de outros dados, a relação de Yokoi recomendada para tal caso pode ser representada pela seguinte equação:

$$\frac{\chi}{h} = 0,60 \left[ \frac{z}{h} \right]^{1/3} \quad (2.28)$$

Segundo o AISI (4), onde a distância a qualquer outra janela exceder quatro vezes a largura de cada janela, o valor de  $h$  na equação 2.28 será o valor individual e não o valor ponderado.

#### 2.1.2.4.3.6 Comprimento da Chama ao longo do Eixo

Para o cálculo do comprimento da chama ao longo do eixo,  $X$ , deve-se observar primeiramente em qual dos dois casos a situação se encaixa:

- parede acima da janela e ainda na condição de  $h \leq 1,25\omega$ :

$$X = z + h / 2 \quad (2.29)$$

- sem parede acima da janela ou, se houver parede, para o caso de  $h > 1,25\omega$ :

$$X = \left[ z^2 + (\chi - h / 3)^2 \right]^{1/2} + h / 2 \quad (2.30)$$

Entretanto, o AISI (4) fornece apenas a equação 2.30 para o cálculo do comprimento da chama.

#### 2.1.2.4.3.7 Temperatura da Chama na Janela

A equação seguinte fornece a temperatura da chama na janela, em °C:

$$T_o = 518 / [1 - 0,027(X \cdot \omega / R)] + T_a \quad (2.31)$$

onde:

$T_a$  = temperatura do ar ambiente externo.

#### 2.1.2.4.3.8 Emissividade na Janela

Os corpos aquecidos emitem radiações térmicas que, ao serem absorvidas por outro corpo, provocam nele uma elevação de temperatura. Essas radiações são tipos de ondas eletromagnéticas capazes de se propagar no vácuo.

Quando a radiação térmica incide em um corpo, parte dela é absorvida e parte é refletida por ele. Os corpos escuros absorvem a maior parte da radiação que neles incide. Porém, os corpos claros refletem quase toda a radiação térmica incidente.

Define-se emissividade de um corpo como sendo a relação entre o poder emissivo de um corpo e o poder emissivo de um corpo negro à mesma temperatura. Deve-se saber, então, que o poder emissivo de um corpo é a energia emitida pelo corpo por unidade de área e por unidade de tempo. Existem certas substâncias, tais como o negro do fumo, cuja absortividade é aproximadamente igual à unidade. Para fins teóricos, é útil imaginar uma substância ideal capaz de absorver toda a radiação térmica que incide sobre ela. Tal substância é chamada corpo negro. Logo, sabe-se que, a emissividade de um corpo negro é também igual à unidade. O conceito de corpo negro é uma idealização que serve para comparar as características da emissão e da absorção dos corpos reais.

O fluxo máximo de radiação emitido por um corpo à temperatura  $T$  é dado pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$\epsilon_{\text{negro}} = \sigma \cdot T^4 \quad (2.32)$$

onde:

$$\sigma = \text{constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é } 56,7 \times 10^{-12} \text{ kW / (m}^2 \cdot \text{°C}^4 \text{),}$$

O fluxo máximo de radiação apresentado na equação 2.32 é também chamado de poder emissivo do corpo negro. Somente um radiador ideal, o chamado corpo negro, pode emitir radiação de acordo com a equação 2.32.

Se dois corpos, em temperaturas diferentes, se encontrarem afastados da vizinhança, há entre eles uma permuta de calor por radiação. Se o meio intermediário estiver preenchido por uma substância transparente à radiação, como o ar, a radiação emitida por um dos corpos atravessa o meio sem nenhuma atenuação e atinge o outro corpo, e vice-versa. Assim, o corpo quente experimenta uma perda líquida de calor, e o corpo frio, um ganho líquido de calor, em virtude da permuta de radiação térmica. Após alcançarem o equilíbrio pode-se dizer que a quantidade de energia absorvida por um dos corpos é igual à emitida pelo mesmo, ou seja:

$$A_1 \cdot a_1 \cdot \text{Ener} = A_1 \cdot \varepsilon_1 \quad (2.33)$$

$$A_2 \cdot a_2 \cdot \text{Ener} = A_2 \cdot \varepsilon_2 \quad (2.34)$$

onde:

$A_j$  = área dos corpos;

$a_j$  = absortividade, ou seja, fração da energia incidente que é absorvida pelo corpo receptor;

$\text{Ener}$  = energia de radiação incidente;

$\varepsilon_j$  = poder emissivo dos corpos.

Fazendo-se o quociente membro a membro da equação 2.33 pela 2.34 tem-se a Lei de Kirchoff:

$$\frac{\epsilon_1}{a_1} = \frac{\epsilon_2}{a_2} \quad (2.35)$$

O valor máximo de ' $\epsilon$ ' ocorre para o valor máximo de ' $a$ '. Dessa forma o fluxo de radiação emitido por um corpo real é sempre menor do que a emitância do corpo negro  $\epsilon_{\text{negro}}$ , sendo dado por:

$$\epsilon_{\text{corpo}} = \epsilon \cdot \epsilon_{\text{negro}} \quad (2.36)$$

Onde a emissividade ' $\epsilon$ ' fica entre zero e a unidade; em todos os corpos reais, é sempre menor que a unidade.

O poder de absorção ' $a$ ' de um corpo é geralmente diferente de sua emissividade ' $\epsilon$ '. Entretanto, em muitas aplicações práticas, admite-se, para simplificar a análise, ser ' $a$ ' igual a ' $\epsilon$ '.

Como para o corpo negro a absorvidade é igual à unidade, a partir da equação 2.36 tem-se que:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{\text{corpo}}}{\epsilon_{\text{negro}}} = \frac{a}{1} = a \quad (2.37)$$

Neste trabalho, considera-se que a emissividade na janela, um termo adimensional, seja igual à unidade, pois o compartimento de incêndio é tido como um radiador ideal, isto é, com características próximas ao do corpo negro.

#### 2.1.2.4.3.9 Distribuição da Temperatura ao longo do Eixo da Chama

Para se calcular a transferência de calor para o aço, é necessário saber a temperatura da chama em um determinado ponto, como, por exemplo, o lado oposto ao topo de uma janela. Há uma relação entre as temperaturas ao longo do eixo a uma distância  $l$ , a largura da janela e a taxa de queima. Segundo Law (3), Seigel analisou tais parâmetros, utilizando-se dos dados de ventilação natural e os associou em termos de  $l\omega / R$ , como apresentado na equação 2.38.

$$\frac{T_z - T_a}{T_o - T_a} = 1 - 0,027 \frac{l\omega}{R} \quad (2.38)$$

onde:

$l$  = comprimento do eixo da chama a partir da janela até o ponto onde o cálculo for feito.

onde:

o subíndice **z** refere-se às chamas externas;

o subíndice **o** à janela;

o subíndice **a** ao ar ambiente externo.

O significado da equação 2.38 é que a diminuição da temperatura da chama é diretamente proporcional à distância ao longo do eixo da chama. Substituindo-se  $T_z = 518^\circ\text{C}$  (assume-se uma temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ ) e  $l = X$  na equação 2.38, o valor de  $T_o$  pode ser determinado. Como aqui consideram-se as condições de ventilação natural, os valores encontrados para  $T_o$  podem ser maiores que a

temperatura de incêndio  $T_f$ . Este não é um resultado inesperado, uma vez que quantidades consideráveis de gás não queimado podem ser emitidas para fora do compartimento incendiado, fazendo com que a combustão ocorra do lado de fora da janela. Isso acontece porque pode faltar oxigênio para a combustão acelerada dos gases dentro do compartimento.

A curva da equação 2.38 está traçada na figura 2.19.

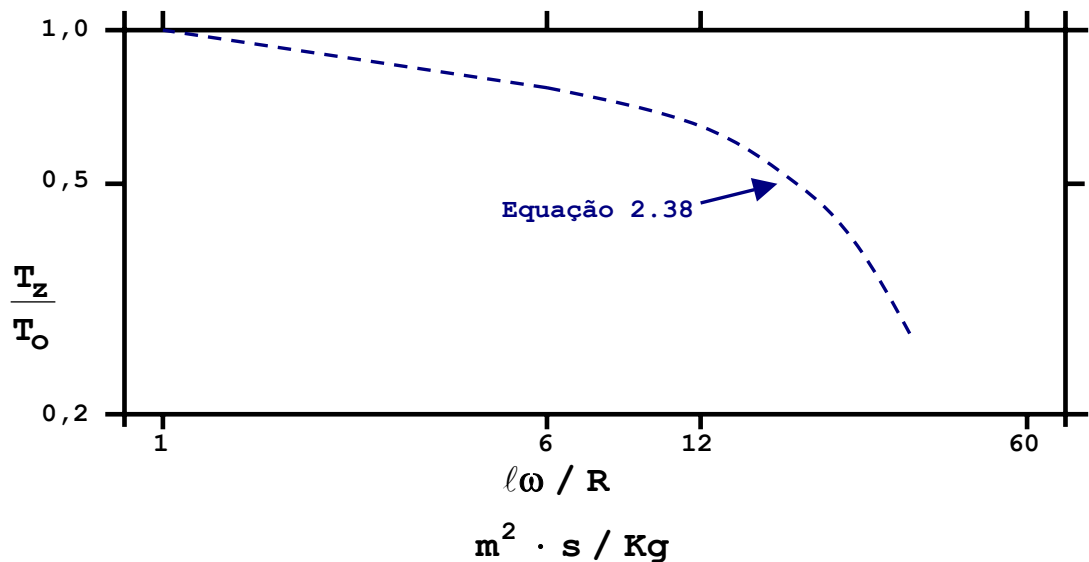


Figura 2.19: Distribuição da temperatura da chama para testes em escala natural com ventilação natural

#### 2.1.2.4.3.10 Emissividade da Chama

O valor da emissividade da chama,  $\epsilon_z$ , depende da espessura da própria chama,  $\lambda$ , podendo-se admitir que resulte em uma relação da seguinte forma:

$$\varepsilon_z = 1 - e^{-b\lambda} \quad (2.39)$$

Segundo Law (3), Beyreis et al. realizaram experiências com as chamas provenientes da queima da madeira em um invólucro, determinando, assim, um valor de  $0,518 \text{ m}^{-1}$  para o termo  $b$ . Entretanto, de acordo com Law (3), esse valor é um pouco mais alto que o admitido por Seigel para as chamas externas ao invólucro ou mesmo maior que  $0,30 \text{ m}^{-1}$ , que é o valor sugerido por Heselden. Nos laboratórios de Borehamwood, realizaram-se ensaios em escala natural, onde um medidor de fluxo de calor foi colocado na parede a uma altura de 55cm acima do topo da janela. Com estes testes, conseguiram-se obter medidas diretas do fluxo de calor proveniente das chamas emergentes. Como o valor medido do fluxo de calor está diretamente relacionado à emissividade das chamas, optaram por substituir o termo  $\lambda = 2h / 3$  na equação 2.39 a fim de generalizar o resultado. Deste modo, é fornecido um valor de  $0,30 \text{ m}^{-1}$  para  $b$ , que coincide com o valor sugerido por Heselden, de acordo com Law (3). Logo, recomenda-se que, para as chamas que se emergem das janelas, seja utilizada a seguinte equação para o cálculo de sua emissividade:

$$\varepsilon_z = 1 - e^{-0,30\lambda} \quad (2.40)$$

#### 2.1.2.4.4 Ventilação Forçada

Alguns ensaios foram realizados com a introdução de ar suplementar, como suporte, no compartimento de incêndio, sendo este ar denominado de "ventilação forçada".



#### 2.1.2.4.4.1 Taxa de Queima

Não há muita informação disponível sobre os efeitos de ventilação forçada na taxa de queima, mas, segundo Law (3), durante os testes dos Laboratórios Underwriters, pode-se concluir que seu efeito máximo seria dar a condição de queima-livre da equação 2.12, isto é,  $R = L / t_F$ .

#### 2.1.2.4.4.2 Temperatura de Incêndio dentro do Compartimento

Conforme apresenta Law (3), os dados obtidos dos Laboratórios Underwriters não mostram nenhuma variação significativa de temperatura com  $\eta$  ou ar suplementar. Entretanto, Law (3) concluiu que  $T_f$  pode ser relacionado a  $\psi$ , conforme mostrado na figura 2.20. A curva tem a seguinte equação:

$$T_f = 1200(1 - e^{-0,04\psi}) + T_a \quad (2.41)$$

#### 2.1.2.4.4.3 Velocidade do Vento

O incêndio tem o seu comportamento influenciado pela quantidade de ar que for acessível a ele. Nas situações mais comuns, a entrada de ar para combustão se dá pelas janelas, por onde as chamas se emergem. Com esta condição, a chama tende a ocupar os dois terços superiores da janela,

enquanto o ar estiver penetrando através do um terço restante inferior da janela.

Se houver janelas nos lados opostos do cômodo ou compartimento, posicionadas de modo que seja possível ocorrer uma passagem de ar, ou se ar suplementar estiver alimentando o incêndio a partir de uma outra fonte, as chamas tenderão a se emergir de toda a área da janela.

Para este caso de ventilação forçada, torna-se necessário estimar a velocidade do vento , representada pelo termo  $u$ .

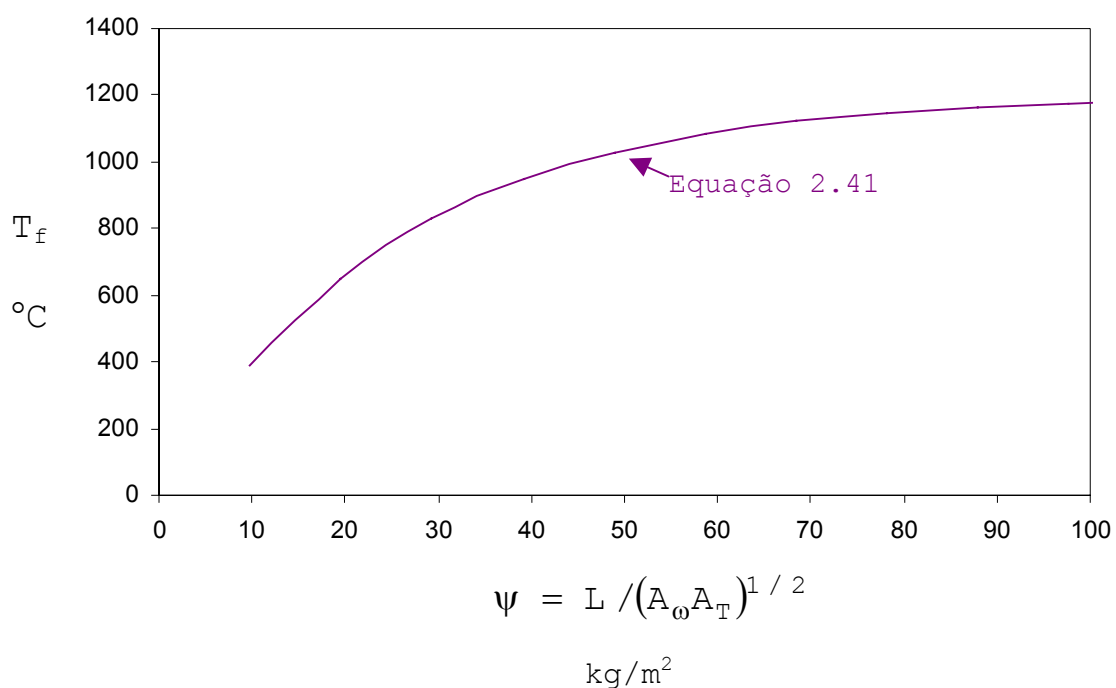


Figura 2.20: Variação da temperatura média de um incêndio com a carga de incêndio, o tamanho do compartimento e a área da janela, considerando ventilação forçada, sendo os dados dos Laboratórios Underwriters.

#### 2.1.2.4.4.4 Altura da Chama

Para uma dada taxa de queima, o vento também pode afetar o tamanho e a direção da chama. A posição do topo da chama, ou seja, o ponto situado no eixo da chama onde a temperatura atinge 538°C, pode ser determinado a partir de relações oriundas da análise de dados experimentais. Para condições de ventilação forçada, os efeitos de ascensão e turbulência da mistura de gases quentes são menos significativos e a chama se parece com um jato. Law (3) fez, então, uma análise de regressão dos dados, similar àquela para ventilação natural, porém incluindo um valor de Froude igual a  $(u^2/gh)$ . Logo obteve-se a seguinte equação:

$$\frac{z + h}{h} = 6,9 \left[ \frac{R}{A_{\omega} \rho_z (gh)^{1/2}} \right]^{0,784} n^{0,434} \left[ \frac{u^2}{gh} \right]^{-0,216} \quad (2.42)$$

A equação 2.42 também pode ser escrita como:

$$u^{0,432} (z + h) = 11,3 \left[ \frac{R}{A_{\omega}^{1/2}} \right]^{0,784} \quad (2.43)$$

Seigel, então, propõe a equação 2.44, conforme apresentado por Law (3), com o termo  $R / A_{\omega}^{1/2}$  aumentado à potência unitária e considerando-se incluso o efeito do vento.

$$z = 16,9 \left( \frac{1}{u} \right)^{0,43} \left( \frac{R}{A_{\omega}^{1/2}} \right) - h \quad (2.44)$$

Um pouco mais tarde, a primeira edição do AISI (4) é publicada, apresentando a equação 2.45 como sendo a relação recomendada para o cálculo da altura da chama. Tal equação relaciona a taxa de queima, que é uma medida de produção de gases quentes, com a área total da janela por onde o ar deve entrar e os gases quentes escaparem e ainda utiliza a velocidade do vento.

$$z + h = 17,7 \left( \frac{1}{u} \right)^{0,43} \frac{R}{A_{\omega}^{1/2}} \quad (2.45)$$

Alguns anos depois, com a publicação do Eurocode 3 Part 1-2 (2), a relação para cálculo da altura da chama foi ajustada para:

$$z = 23,9 \left( \frac{1}{u} \right)^{0,43} \left( \frac{R}{A_{\omega}^{1/2}} \right) - h \quad (2.46)$$

De acordo com Law (3), a figura 2.21 mostra a relação sugerida por Seigel, considerando os ensaios feitos nos Laboratórios Underwriters, com um valor médio de  $u=0,9144$  m/s.

A figura 2.22 ilustra as dimensões da chama, para ventilação forçada, tais como sua altura, projeção horizontal, largura e comprimento ao longo de seu eixo.

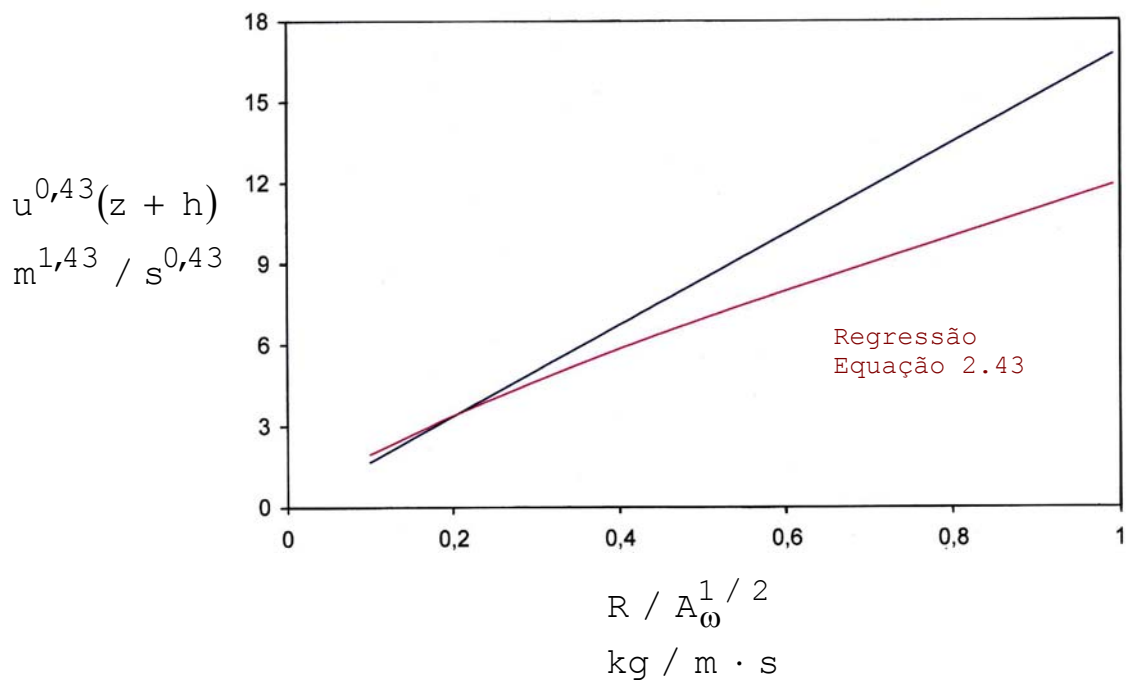


Figura 2.21: Alturas da chama para ensaios em escala natural com ventilação forçada, considerando os dados dos Laboratórios Underwriters.

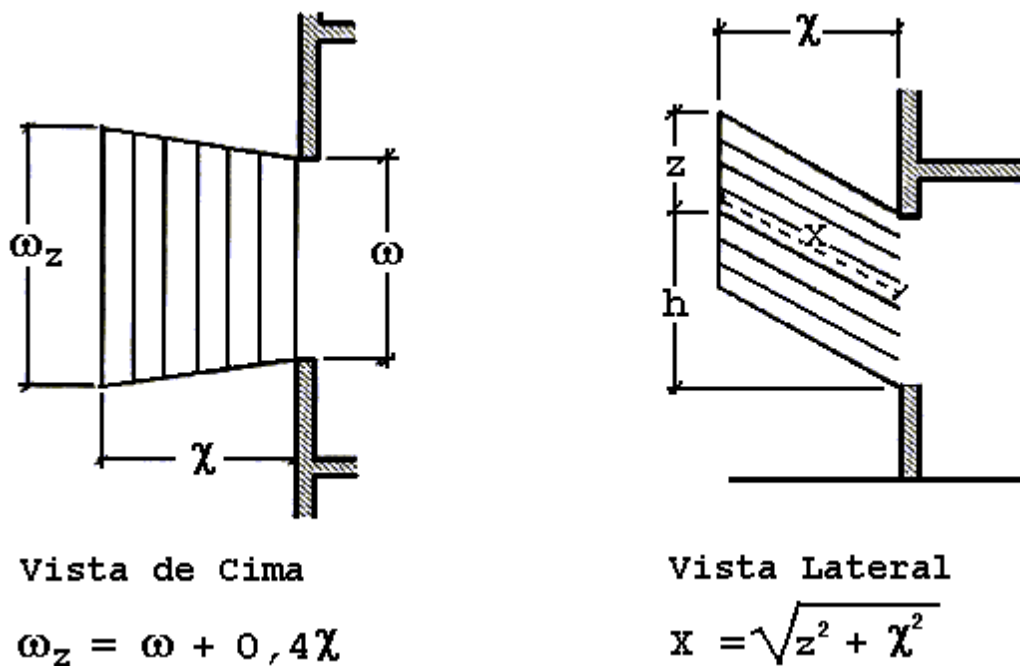


Figura 2.22: Dimensões da chama para ventilação forçada

#### 2.1.2.4.4.5 *Projeção Horizontal da Chama*

A projeção horizontal de uma chama em ventilação forçada não depende do formato das janelas ou da natureza da fachada acima das janelas, como acontece com as chamas em situações de ventilação natural.

Uma análise de dados experimentais, similar àquela realizada para a altura da chama, mostra uma relação entre projeção horizontal, altura da chama, altura da janela e velocidade do vento. Logo, obteve-se a seguinte equação:

$$\frac{\chi}{h} = 6,85 \left[ \frac{R}{A_w \rho_z (gh)^{1/2}} \right]^{0,760} n^{0,444} \quad (2.47)$$

sendo o valor de Froude ( $u^2/gh$ ) não significativo.

Com as equações 2.42 e 2.47 pode-se deduzir que:

$$\chi \cong \left[ \frac{u^2}{gh} \right]^{0,216} (z + h) \quad (2.48)$$

Law (3) apresenta a equação 2.49 para o cálculo da projeção horizontal da chama para situações de ventilação forçada:

$$\chi = 0,61 \left[ \frac{u^2}{h} \right]^{0,22} (z + h) \quad (2.49)$$

Os dados da equação 2.49 estão marcados na figura 2.23.

O AISI (4) comenta que, ao avaliar a relação anterior, conclui-se que quando a velocidade do vento aumenta, a altura da chama diminui, mas a projeção horizontal aumenta.

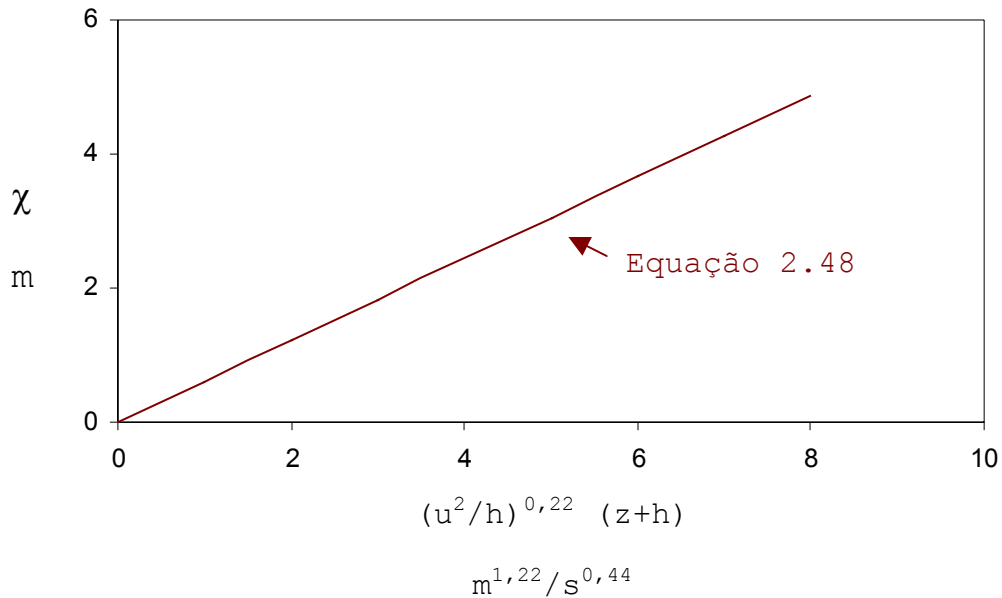


Figura 2.23: Projeção horizontal da chama para ensaios em escala natural com ventilação forçada, considerando os dados dos Laboratórios Underwriters.

#### 2.1.2.4.4.6 Largura da Chama

A largura máxima das chamas emergentes,  $\omega_z$ , normalmente excede a largura da janela. O valor médio do ângulo feito pela chama emergente é de  $11^\circ$ , como mostrado na figura 2.24, e sabe-se que ele não se relaciona a nenhum parâmetro adimensional considerado anteriormente. Logo, para o cálculo da largura da chama, utilizam-se as equações 2.50.

$$\frac{\omega_z - \omega}{2\chi} = 0,194$$

ou

$$\omega_z \cong \omega + 0,4\chi \quad (2.50)$$

Para esta situação, assume-se que o formato da chama permaneça constante.

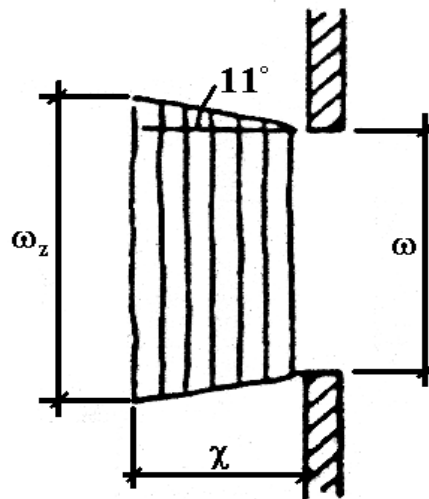


Figura 2.24: Vista de cima das chamas emergentes com ventilação forçada.

#### 2.1.2.4.4.7 Comprimento da Chama ao Longo do Eixo

Segundo Law (3), Seigel, ao tratar a chama como um jato, propôs uma equação da forma:

$$l \propto \frac{R}{A_{\omega}^{1/2} (T_z - T_a)} \quad (2.51)$$



onde:

$\ell$  = comprimento da chama ao longo do seu eixo.

De acordo com Law (3), a partir dos dados obtidos pelos laboratórios Underwriters, Seigel mostrou que no topo da chama, onde  $\ell = X$ , tem-se a equação:

$$X = 0,01044 \frac{L}{A_{\omega}^{1/2}} - 0,3901 \quad (2.52)$$

A equação 2.52 deve ser utilizada em incêndios com queima "normal". Queima normal foi definida como ventilação suficiente para que a madeira utilizada como carga de incêndio se queime à sua taxa máxima, ou seja, como se fosse queima-livre.

Para o tipo de madeira citado anteriormente, o valor de  $t_F$  obtido foi de 1560 segundos. Logo a equação 2.52 pode ser escrita da seguinte forma:

$$X = 16,286 \frac{R}{A_{\omega}^{1/2}} - 0,3901 \quad (2.53)$$

sendo:

$$R = \frac{L}{t_F} = \frac{L}{1560}$$

Segundo Law (3), a relação de Siegel foi baseada na suposição de que o principal efeito de uma ventilação forçada é aumentar a taxa de queima de um incêndio com ventilação controlada. Portanto, o efeito em incêndios de

“queima-livre” foi insignificante no raio de ação da ventilação forçada usada.

O comprimento da chama pode também ser calculado a partir de simples considerações geométricas, como ilustrado na figura 2.22. Logo, a distância ao longo do eixo da chama,  $X$ , a partir do plano da janela até o topo da chama, pode ser obtida pela equação seguinte:

$$X = \left(z^2 + \chi^2\right)^{1/2} \quad (2.54)$$

#### 2.1.2.4.4.8 *Temperatura da Chama na Janela*

Law (3) sugere a relação a seguir para o cálculo da temperatura da chama na janela:

$$T_o = 518 \left[1 - 0,027X(A_w)^{1/2} / R\right] + T_a \quad (2.55)$$

Entretanto, alguns anos mais tarde, o Eurocode 3 Part 1-2 (2) apresenta a equação 2.55 modificada para a seguinte relação:

$$T_o = 518 \left[1 - 0,019X(A_w)^{1/2} / R\right] + T_a \quad (2.56)$$

sendo que o valor de  $T_o$  é dado em °C.

#### 2.1.2.4.4.9 Emissividade na Janela

Considera-se que a emissividade na janela, que é a emissividade do incêndio proveniente da abertura do compartimento, seja de valor unitário para condições de ventilação forçada.

$$\varepsilon_f = 1$$

#### 2.1.2.4.4.10 Temperatura da Chama ao longo do Eixo:

Conforme mostra Law (3), Seigel analisou a distribuição de temperatura nas chamas ao considerar os dados de ventilação forçada obtidos em laboratório e chegou à relação a seguir.

$$\text{para } \frac{lA_{\omega}^{1/2}}{R} > 6,38 : \frac{T_z - T_a}{T_o - T_a} = 4,067 \left[ \frac{lA_{\omega}^{1/2}}{R} \right]^{-3/4} \quad (2.57)$$

$$\text{para } \frac{lA_{\omega}^{1/2}}{R} < 6,38 : \frac{T_z - T_a}{T_o - T_a} = 1,0$$

onde:

$T_z$  é medida no eixo da chama;

$T_o$  é medida na janela.

A equação 2.57 acompanha a distribuição de temperatura encontrada para jatos, conforme dados marcados na figura 2.25. Deve-se observar que ao combinar as equações 2.53 e

2.57 obtém-se  $(T_z/T_0) \cong 0,5$ , o que é correto afirmar no topo da chama.

Sugere-se, então, a equação 2.58 em substituição à relação 2.57, com a vantagem, sob o ponto de vista analítico, de se evitar uma descontinuidade.

$$\frac{T_z - T_a}{T_0 - T_a} = 1 - 0,027 \frac{\ell A_\omega^{1/2}}{R} \quad (2.58)$$

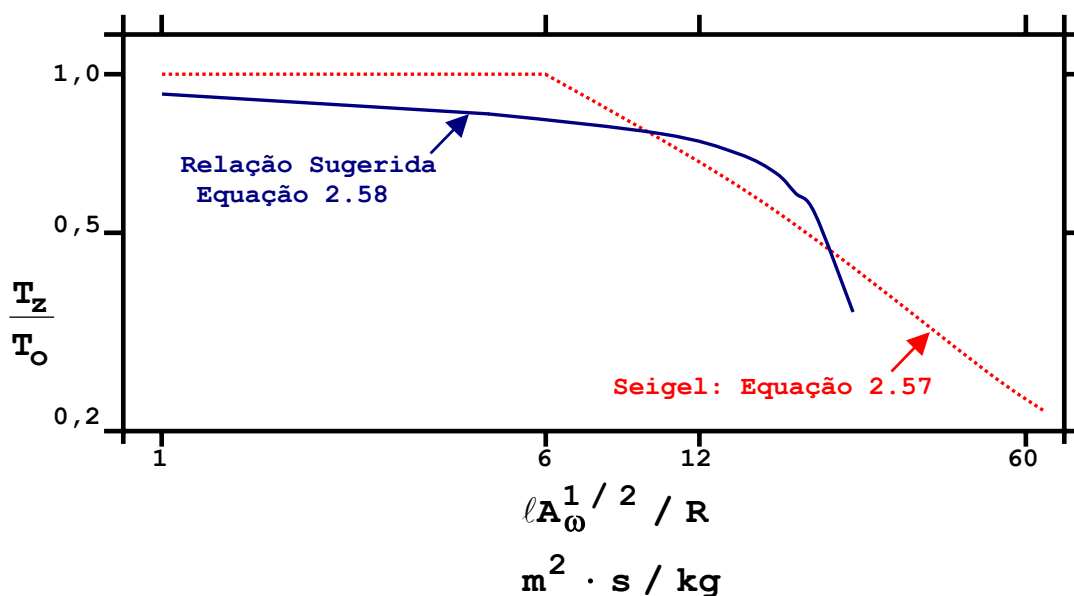


Figura 2.25: Distribuição da temperatura da chama para ensaios em escala natural com ventilação forçada, considerando os dados dos Laboratórios Underwriters.

O significado da equação 2.58 é que a diminuição da temperatura da chama é diretamente proporcional à distância ao longo do eixo da chama. Ao substituir  $T_z$  por um valor aproximado de  $538^\circ\text{C}$ , a temperatura ambiente por aproximadamente  $20^\circ\text{C}$  e  $\ell = X$  na equação 2.58, o valor de  $T_0$

pode ser determinado. Para esta situação de incêndios com ventilação forçada, os valores de  $T_0$  podem ser menores que  $T_f$ .

Já a relação recomendada pelo AISI (4) para a distribuição da temperatura ao longo do eixo da chama é apresentada a seguir:

$$\frac{(T_z - T_a)}{(T_o - T_a)} = 1 - 0,23 \frac{\ell A \omega^{1/2}}{R} \quad (2.59)$$

Já o Eurocode 3 Part 1-2 (2) modifica a equação para:

$$T_z = \left[ 1 - 0,019 \frac{\ell(A\omega)^{1/2}}{R} \right] (T_o - T_a) + T_a \quad (2.60)$$

#### 2.1.2.4.4.11 Emissividade da Chama

A emissividade da chama,  $\epsilon_z$ , é uma função exponencial da espessura da chama.

$$\epsilon_z = 1 - e^{-0,3\lambda} \quad (2.61)$$

onde:

$\lambda$  = espessura da chama.

2.1.2.4.4.12 Efeito da Sacada ou Toldo em uma Chama

Após a chama sofrer uma inclinação horizontal, ocasionada pela presença de uma sacada ou um toldo, a sua trajetória torna-se a mesma que a anterior, deslocada externamente pela profundidade da sacada, mas o valor de  $X$  fica inalterado. A figura 2.26 ilustra a inclinação de uma chama.

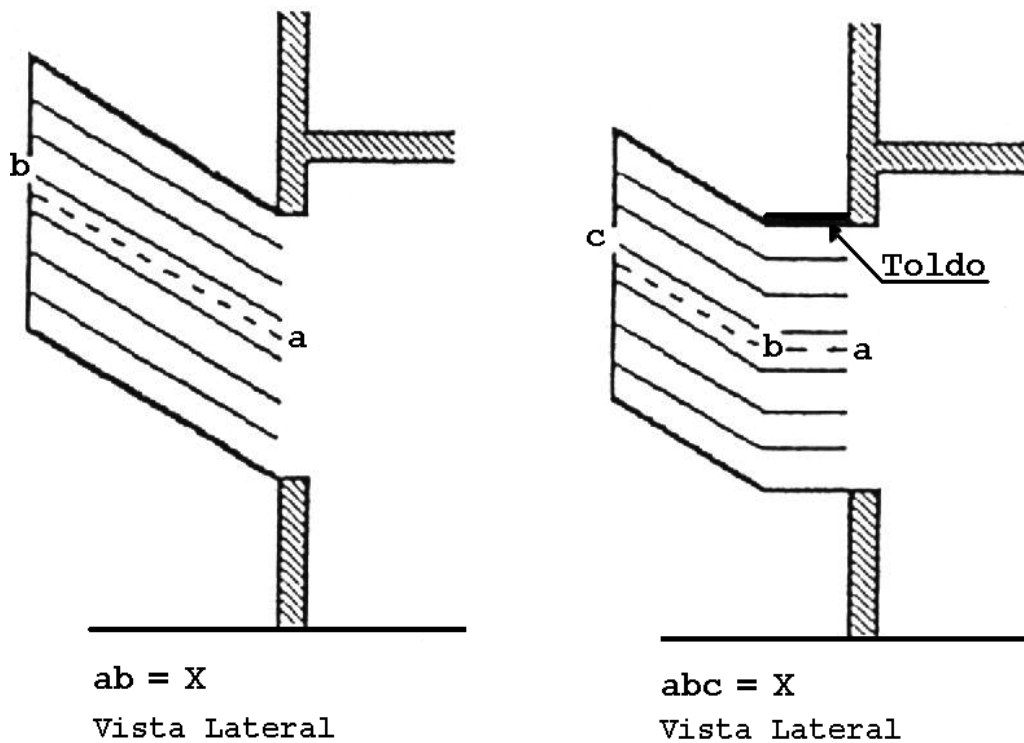


Figura 2.26: Inclinação da chama por um toldo

### 2.1.3 DIMENSÕES E FACES DAS PEÇAS

A convenção usada para as dimensões  $d_1$  e  $d_2$  de uma peça e a notação utilizada para identificar suas quatro faces estão indicadas nas figuras 2.27 e 2.28. O símbolo  $d$  é usado para identificar a característica geométrica de uma peça estrutural externa, ou seja, o seu diâmetro ou lado.

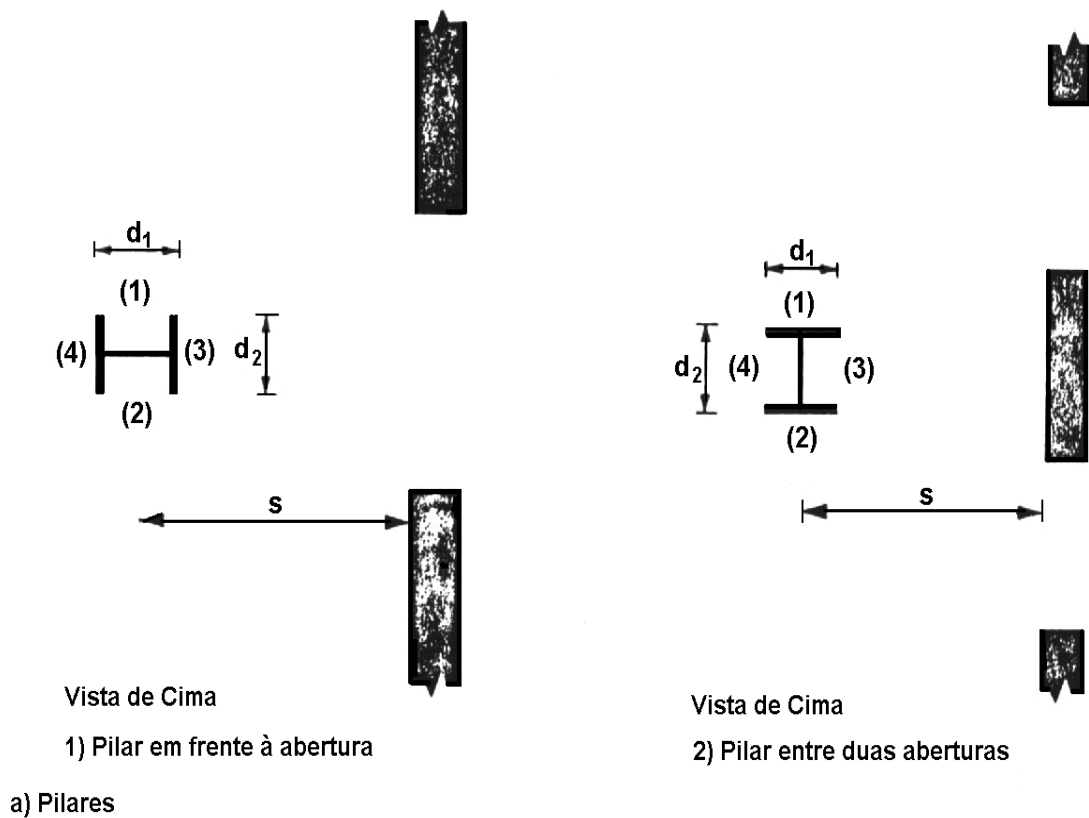
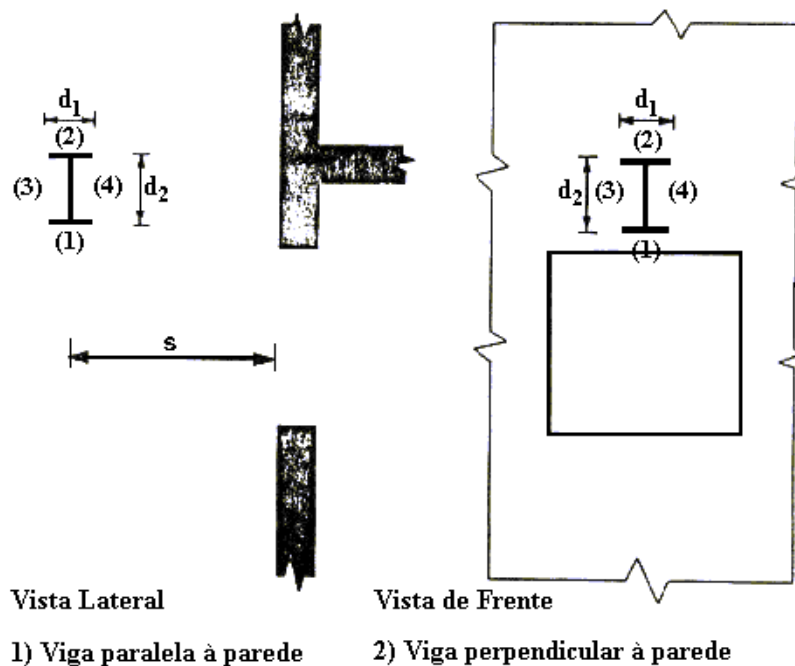


Figura 2.27: Dimensões e faces dos pilares



**b) Vigas**

Figura 2.28: Dimensões e faces das vigas

**2.1.4 DISTÂNCIA DE SEGURANÇA DA PAREDE AO PILAR**

As tabelas a seguir são apresentadas pelo AISI (4). Os seus valores são conservativos e devem servir de parâmetros, os quais restrinjam a temperatura do aço a valores abaixo do crítico, que o AISI (4) considera ser aproximadamente igual a 538°C. Para todas as tabelas considera-se um valor médio para a densidade de incêndio igual a 50kg/m<sup>2</sup>.

Geralmente, para verificar a localização dos elementos externos de aço, o uso dessas tabelas pode ser a melhor maneira de se alcançar soluções preliminares. Uma vez estabelecidas por tabelas, as áreas críticas, que podem não estar incluídas nas tabelas, ou que podem apresentar cargas de incêndio de combustíveis totalmente diferentes, podem,



então, ser examinadas através dos procedimentos matemáticos e assim verificada a segurança dos elementos contra incêndio.

#### 2.1.4.1 Pilares em Frente às Janelas em Apenas uma Parede do Compartimento

Para esta situação, ilustrada na figura 2.29, a distância mínima de segurança,  $S$ , entre a face externa da parede do compartimento e o pilar é encontrada na tabela 2.2.

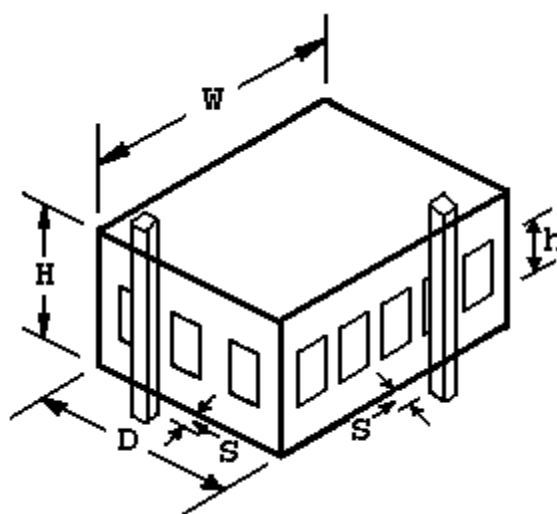


Figura 2.29: Pilares em frente às janelas em apenas uma parede do compartimento

H m	A <sub>0</sub> %	h m	D m	Valores de S para:					
				W=4,6m	9,1m	18,3m	36,6m	73,2m	
2,7	100	2,7	4,6	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	
			9,1	2,1	2,1	2,4	2,7	2,7	
			18,3	2,4	3,7	4,6	5,2	5,2	
	50	1,4	4,6	1,5	2,1	2,1	2,1	2,4	
			4,6	2,1	2,1	2,7	3,0	3,4	
			9,1	1,8	2,4	2,7	3,0	3,0	
			9,1	2,1	2,7	4,0	4,9	5,5	
			18,3	1,8	2,4	2,7	3,0	3,0	
			18,3	2,1	2,4	3,7	4,6	5,5	
	25	0,7	4,6	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	
			4,6	2,1	2,1	2,7	4,0	4,9	
			9,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
			9,1	2,1	2,1	2,4	3,4	4,3	
			18,3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
			18,3	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	
	3,7	100	3,7	4,6	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
				9,1	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
				18,3	2,7	3,4	4,3	4,9	5,2
50		1,8	4,6	1,5	1,8	1,8	1,8	1,8	
			4,6	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	
			9,1	2,1	2,7	3,4	3,7	3,7	
			9,1	2,7	2,7	4,0	4,9	5,5	
			18,3	2,1	2,7	3,4	3,7	3,7	
			18,3	2,7	3,0	4,6	6,1	7,3	
25		0,9	4,6	1,2	1,5	1,5	1,8	1,8	
			4,6	2,7	2,7	2,7	4,0	5,2	
			9,1	0,9	0,9	1,2	1,2	1,2	
			9,1	2,7	2,7	3,0	4,6	6,1	
			18,3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
			18,3	2,7	2,7	2,7	3,7	4,9	

Tabela 2.2: Distância mínima de segurança, S, entre a face da parede externa do compartimento e o pilar, considerando-se apenas uma parede

H m	A <sub>0</sub> %	h m	D m	Valores de S para:				
				W=4,6m	9,1m	18,3m	36,6m	73,2m
4,6	100	4,6	3,4	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
			3,4	2,1	2,1	2,4	2,7	2,7
			3,4	2,4	3,7	4,6	5,2	5,2
	50	2,3	4,6	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
			4,6	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
			9,1	2,1	2,7	3,4	3,7	3,7
			9,1	3,4	3,4	3,4	4,6	4,9
			18,3	2,1	2,7	3,4	3,7	3,7
			18,3	3,4	3,4	4,9	6,7	8,2
25	1,1	4,6	1,5	1,8	2,1	2,1	2,1	
		4,6	3,4	3,4	3,4	3,7	4,9	
		9,1	1,2	1,5	1,8	2,1	2,1	
		9,1	3,4	3,4	3,4	5,2	7,0	
		18,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	
		18,3	3,4	3,4	3,4	5,2	7,0	

Tabela 2.2: Distância mínima de segurança, S, entre a face da parede externa do compartimento e o pilar, considerando-se apenas uma parede

#### 2.1.4.2 Pilares em Frente às Janelas em Duas Paredes do Compartimento

Para esta situação, ilustrada na figura 2.30, a distância mínima de segurança, S, entre a face da parede externa do compartimento e o pilar é encontrada na tabela 2.3.

H m	A <sub>0</sub> %	h m	D m	Valores de S para:			
				W=9,1m	18,3m	36,6m	73,2m
2,7	100	2,7	9,1	2,1	2,1	2,1	2,1
		2,7	18,3	2,1	2,1	3,7	4,6
		2,7	36,6	2,1	3,7	4,9	5,8
		2,7	73,2	2,1	4,6	5,8	5,8
2,7	50	1,4	9,1	2,1	2,7	2,7	3,0
		2,7	9,1	2,1	3,0	4,3	5,2
		1,4	18,3	2,7	2,7	2,7	2,7
		2,7	18,3	3,0	3,7	5,2	5,8
		1,4	36,6	2,7	2,7	2,1	1,5
		2,7	36,6	4,3	5,2	4,9	4,6
		1,4	73,2	3,0	2,7	1,5	1,2
		2,7	73,2	5,2	5,8	4,6	2,7
2,7	25	0,7	9,1	1,5	1,2	0,9	0,9
		2,7	9,1	2,1	2,7	4,0	4,6
		0,7	18,3	1,2	0,9	0,9	0,9
		2,7	18,3	2,7	2,7	3,0	3,0
		0,7	36,6	0,9	0,9	0,9	0,9
		2,7	36,6	4,0	3,0	2,1	2,1
		0,7	73,2	0,9	0,9	0,9	0,9
		2,7	73,2	4,6	3,0	2,1	2,1

Tabela 2.3: Distância mínima de segurança, S, entre a face da parede externa do compartimento e o pilar, considerando-se duas paredes

H m	A <sub>0</sub> %	h m	D m	Valores de S para:			
				W=9,1m	18,3m	36,6m	73,2m
3,7	100	3,7	9,1	2,7	2,7	2,7	2,7
		3,7	18,3	2,7	2,7	2,7	2,7
		3,7	36,6	2,7	2,7	4,6	6,4
		3,7	73,2	2,7	3,7	6,4	7,6
	50	1,8	9,1	2,4	2,4	3,0	3,4
		3,7	9,1	2,7	2,7	4,0	4,9
		1,8	18,3	2,4	3,4	4,0	4,0
		3,7	18,3	2,7	3,7	5,5	7,0
		1,8	36,6	3,0	4,0	3,7	3,4
		3,7	36,6	4,0	5,5	6,1	7,3
		1,8	73,2	3,4	4,0	3,4	3,4
		3,7	73,2	4,9	7,0	7,3	7,3
25	0,9	9,1	1,5	1,8	1,5	1,5	
	3,7	9,1	2,7	3,0	4,6	6,1	
	0,9	18,3	1,8	1,5	0,9	0,9	
	3,7	18,3	3,0	3,4	4,6	5,5	
	0,9	36,6	1,5	0,9	0,9	0,9	
	3,7	36,6	4,6	4,6	4,0	3,7	
	0,9	73,2	1,5	0,9	0,9	0,9	
	3,7	73,2	6,1	5,5	3,7	3,7	
4,6	100	4,6	9,1	3,4	3,4	3,4	3,4
		4,6	18,3	3,4	3,4	3,4	3,4
		4,6	36,6	3,4	3,4	3,4	5,8
		4,6	73,2	3,4	3,4	5,8	7,9

Tabela 2.3: Distância mínima de segurança, S, entre a face da parede externa do compartimento e o pilar, considerando-se duas paredes

H m	A <sub>0</sub> %	h m	D m	Valores de S para:			
				W=9,1m	18,3m	36,6m	73,2m
4,6	50	2,3	9,1	1,8	2,1	2,7	3,0
		4,6	9,1	3,4	3,4	3,4	4,0
		2,3	18,3	2,1	3,0	4,3	4,6
		4,6	18,3	3,4	3,4	5,5	7,3
		2,3	36,6	2,7	4,3	4,6	4,9
		4,6	36,6	3,4	5,5	6,7	8,8
		2,3	73,2	3,0	4,6	4,9	4,9
		4,6	73,2	4,0	7,3	8,8	8,8
	25	1,1	9,1	2,4	2,4	2,4	2,1
		4,6	9,1	3,4	3,4	4,9	7,0
		1,1	18,3	2,4	2,4	1,8	1,5
		4,6	18,3	3,4	3,4	5,2	7,0
		1,1	36,6	2,4	1,8	1,2	1,2
		4,6	36,6	4,9	5,2	5,2	6,1
		1,1	73,2	2,1	1,5	1,2	1,2
		4,6	73,2	7,0	7,0	6,1	4,3

Tabela 2.3: Distância mínima de segurança, S, entre a face da parede externa do compartimento e o pilar, considerando-se duas paredes

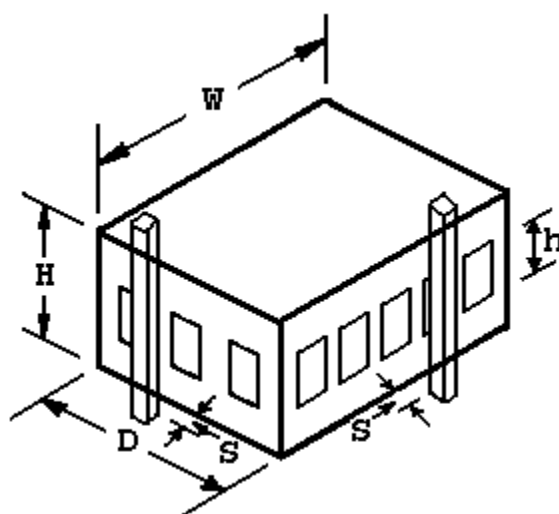


Figura 2.30: Pilares em frente às janelas em duas paredes do compartimento

### 2.1.5 MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR À SUPERFÍCIE DO AÇO EXTERNO

Transferência de calor é a ciência que estuda as características de energia entre corpos materiais causadas por diferenças de temperatura. A forma de energia transferida através da fronteira de um sistema numa dada temperatura, a um outro sistema (ou o meio) numa temperatura inferior, em virtude da diferença de temperatura entre os dois sistemas, é definida pela termodinâmica como calor. Logo, para melhor compreensão deste item, deve-se, primeiramente, definir quais são os mecanismos de transferência de calor.

#### 1º) Condução:

Condução é o modo de transferência de calor em que a troca de energia tem lugar da região de alta temperatura para a de baixa temperatura pelo movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas, no caso de fluidos em repouso, e pelo movimento de elétrons, no caso de metais.

A temperatura é uma propriedade indicadora da energia cinética possuída pelas moléculas, átomos e partículas subatômicas de uma substância. Imagina-se um meio material constituído por uma infinidade de partículas, supondo-se que uma determinada região deste meio possua uma temperatura mais elevada que o restante. Logo, as partículas inseridas nesta região sofrerão uma maior agitação, conforme ilustrado na figura 2.31.

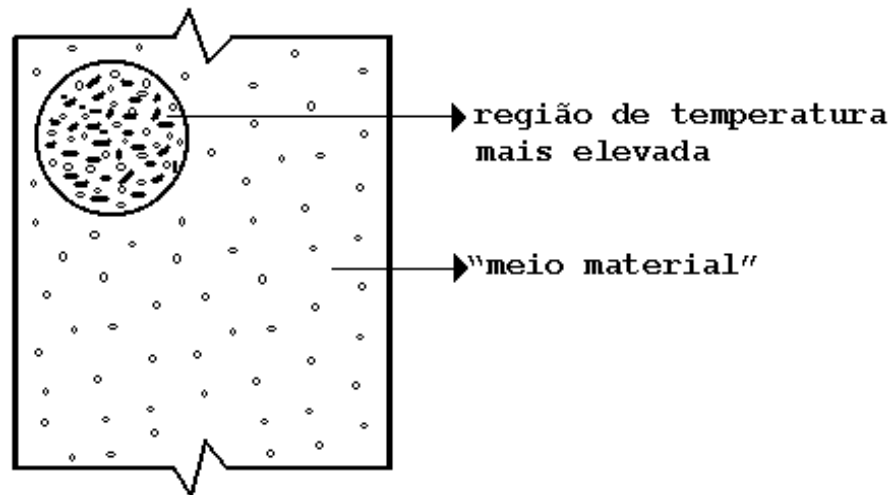


Figura 2.31: Transferência de calor por condução

A agitação destas partículas ainda que sem abandono de sua posição inicial, isto é, a vibração maior das mesmas em torno de uma posição inicial fixa, será transmitida aos poucos às partículas vizinhas, gerando com isto a transferência de calor dentro do meio.

A transferência de calor por condução ocorre dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato físico direto, desde que exista uma diferença de temperatura entre eles.

A partir do que foi exposto anteriormente, pode-se, então, concluir que necessariamente deve existir um meio material para que o mecanismo se processe, isto é, quando mais efetivo o contato entre dois corpos a temperaturas distintas, maior a potencialidade de ocorrência de transferência de calor por condução. É neste sentido que se explica a maior condução de calor nos materiais sólidos, como o aço, por exemplo, onde as partículas estão muito



mais próximas uma das outras em comparação ao que ocorre com os gases.

A energia térmica pode ser conduzida em sólidos de duas maneiras: vibração da grade e transporte por elétrons livres. Em bons condutores elétricos um grande número de elétrons move-se sobre a estrutura do material. Como estes elétrons podem transportar carga elétrica, podem também conduzir energia de uma região de alta temperatura para uma região de baixa temperatura. A energia também pode ser transmitida como energia de vibração na estrutura do material. Entretanto, este último modo de transferência de energia não é tão efetivo quanto o transporte por elétrons, sendo esta a razão pela qual bons condutores elétricos são quase sempre bons condutores de calor e isolantes elétricos geralmente são bons isolantes térmicos.

A unidade da condutividade térmica é watts por metro por grau Celsius quando o fluxo de calor é expresso em watts. Existe uma taxa de calor envolvida, e o valor numérico da condutividade térmica indica a rapidez com que o calor será transferido num dado material.

Com o objetivo de ilustrar a condução de calor, suponha-se uma chapa de aço com suas faces mantidas a temperaturas distintas  $T_A$  e  $T_B$ , com  $T_A > T_B$ , como mostra a figura 2.32. Deve-se ressaltar, ainda, que a condução aqui será considerada em regime permanente, isto é, a temperatura não varia com o tempo. Em outras palavras, o calor que atravessa uma determinada seção é o mesmo que sai por uma seção posterior, não ocorrendo, portanto, armazenamento de calor no trecho em questão.

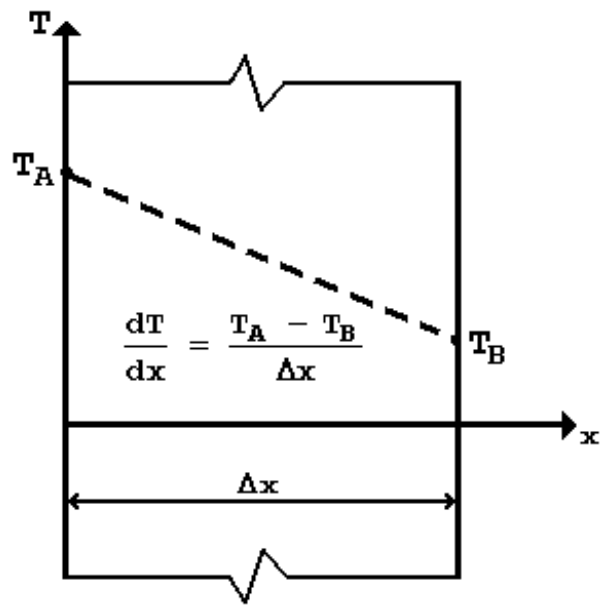


Figura 2.32: Condução em regime permanente

Quando a temperatura varia em uma dada direção, como ao longo do eixo dos  $x$ , há um fluxo de calor ao longo do eixo dos  $x$  dado pela lei de Fourier na forma:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{T_A - T_B}{\Delta x} \quad (2.62)$$

onde:

$Q$  = taxa de fluxo de calor através da área  $A$ ,  $[Q] = W$ ;

$K$  = condutividade térmica do material,  $[K] = \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ;

$A$  = seção atravessada pelo calor,  $[A] = m^2$ ;

$\Delta x$  = percurso realizado,  $[\Delta x] = m$ ;

Se a temperatura decresce no sentido positivo do eixo das abscissas, o valor de  $\frac{T_A - T_B}{\Delta x}$  é negativo; então,  $Q$  fica positivo por causa do sinal negativo na equação 2.62. Portanto, o sinal negativo aparece na equação 2.62 para assegurar que  $Q$  seja uma grandeza positiva quando há um fluxo de calor no sentido positivo dos  $x$ . Inversamente, quando o segundo membro da equação 2.62 for negativo, o fluxo de calor terá o sentido dos  $x$  negativos.

Na análise térmica de corpos que têm a forma de uma placa, ou retângulo, ou paralelepípedo, basta a equação de condução do calor num sistema de coordenadas cartesianas. Entretanto, para analisar a condução de calor em corpos que têm forma de cilindro ou esfera, a equação de condução de calor deve ser expressa nos sistemas de coordenadas cilíndricas e/ou esféricas, respectivamente. Por exemplo, no sistema de coordenadas cilíndricas, uma das superfícies coordenadas é um cilindro; essa superfície coordenada coincide com a fronteira de um corpo que tem a forma de um cilindro.

Para determinar a equação unidimensional da condução de calor, considera-se um elemento de volume de espessura  $\Delta x$  tendo uma área  $A$  normal ao eixo coordenado  $x$ . O balanço de energia nesse elemento de volume é dado por:

$$\left( \begin{array}{l} \text{taxa líquida de} \\ \text{ganho de calor} \\ \text{por condução} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{geração de} \\ \text{energia} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{aumento de} \\ \text{energia interna} \end{array} \right)$$

A segunda equação da condução de calor unidimensional, depende do tempo, nos sistemas de coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas.

Considera-se um sólido cuja temperatura  $T(x,t)$  depende do tempo e varia somente em uma direção, ou seja, ao longo da coordenada  $x$ . Admite-se que o eixo  $x$  no sistema de coordenadas cartesianas refere-se ao usual eixo dos  $x$ ; mas, se for considerado o sistema de coordenadas cilíndricas ou esféricas, ele se refere à coordenada radial  $r$ , como mostra a equação 2.63:

$$\frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n K \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.63)$$

onde:

- $n = 0$  nas coordenadas cartesianas;
- $n = 1$  nas coordenadas cilíndricas;
- $n = 2$  nas coordenadas esféricas.

sendo:

$r$  = coordenada radial;

$K$  = condutividade térmica do material,  $[K] = \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ;

$T$  = temperatura,  $[T] = ^\circ C$ ;

$\rho$  = massa específica do material,  $[\rho] = \frac{kg}{m^3}$ ;

$c$  = calor específico do material,  $[c] = \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ ;

$t$  = tempo,  $[t] = s$ .

## 2º) Convecção

Quando existe um escoamento de um fluido nas imediações de um corpo, estando ambos a temperaturas diferentes, ocorre troca de calor entre eles através do mecanismo denominado convecção. Esta pode ser natural, conforme a figura 2.33, quando o movimento do fluido é decorrente de diferenças de densidade entre regiões distintas do mesmo, ou forçado, quando o movimento é induzido artificialmente por agentes mecânicos tais como ventiladores ou bombas.

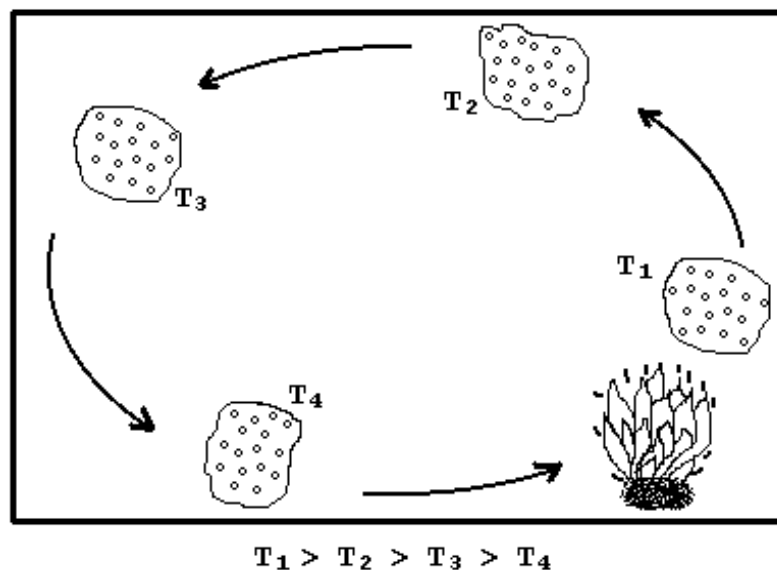


Figura 2.33: Movimentação de um fluido em um ambiente sob a ação de chamas localizadas

A convecção natural tem sua origem no aquecimento de um fluido em uma região localizada, provocando uma diminuição de sua densidade e gerando a tendência de ascensão dessa porção com a conseqüente descida do fluido mais frio que está acima.

Se uma placa de metal aquecida estiver exposta ao ar ambiente sem uma fonte externa de movimentação do fluido, o movimento do ar será devido aos gradientes de densidade nas proximidades da placa. Como o campo de temperaturas no fluido é influenciado pelo movimento do fluido, a determinação da distribuição de temperatura e a transferência de calor na convecção tornam-se complexos. Para simplificar a solução do problema, introduz-se o conceito de coeficiente de transferência de calor por convecção,  $\alpha$ , através da seguinte expressão que determina o fluxo de calor por convecção entre o meio e a superfície em estudo.

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.64)$$

onde:

$\Delta T$  é a diferença de temperatura entre o meio e a superfície,  $[\Delta T] = ^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  é determinado experimentalmente, portanto pode ser obtido através de tabelas,  $[\alpha] = \text{W} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

O coeficiente de transferência de calor  $\alpha$  varia com o tipo de fluxo (isto é, laminar ou turbulento), com a geometria do corpo e a área de escoamento, com a propriedade físicas do fluido, com a temperatura média e com a posição ao longo da superfície do corpo. Depende também de o mecanismo de transferência de calor ser a convecção forçada (isto é, de o movimento do fluido ser provocado por bombeamento). Quando  $\alpha$  varia com a posição ao longo da superfície do corpo, é conveniente considerar, na engenharia, o seu valor médio sobre a superfície, em vez de seu valor local.

Nas aplicações de engenharia, há interesse na perda de carga e na força de arraste associadas ao escoamento sobre corpos.

A análise da convecção é complicada, pois o movimento do fluido afeta a perda de carga, a força de arraste e a transferência de calor. Para determinar a força de arraste, ou a perda de carga, deve ser conhecido o campo de velocidades nas vizinhanças imediatas da superfície. Para determinar a transferência convectiva de calor também se precisa da distribuição de velocidades no escoamento do fluido. Quando um fluido escoar sobre um corpo sólido, a distribuição de velocidades e de temperaturas na vizinhança imediata da superfície influencia fortemente a transferência convectiva de calor. O conceito de camada limite é frequentemente introduzido para modelar os campos de velocidade e de temperatura próximos da superfície sólida, a fim de simplificar a análise de transferência convectiva de calor. Logo, há o envolvimento de dois tipos de camadas limites: a camada limite cinética e a camada limite térmica.

Para ilustrar o conceito de camada limite cinética, considera-se o escoamento de um fluido sobre uma placa plana, como está ilustrado na figura 2.34. O fluido na borda frontal da placa (isto é, em  $x=0$ ) tem uma velocidade  $u_{\infty}$  que é paralela à superfície da placa. À medida que o fluido se move na direção  $x$  ao longo da placa, as partículas do fluido em contato com a face da placa assumem velocidade zero (isto é, não há deslizamento sobre a face da placa). Portanto, a partir da superfície da placa haverá um retardamento da componente  $x$  da velocidade  $u(x,y) \equiv u$ . Isto é, na superfície da placa, em  $y=0$ , a componente axial da

velocidade é zero, ou  $u=0$ . O efeito do retardamento é reduzido quando o fluido se move em uma região afastada da face da placa; a distâncias suficientemente grandes da placa, o efeito de retardamento é nulo, isto é,  $u=u_\infty$  para grandes  $y$ . Portanto, a cada posição  $x$  ao longo da placa, há uma distância  $y=\delta(x)$ , medida a partir da superfície da placa, onde a componente axial da velocidade  $u$  é igual a 99% da velocidade da corrente livre  $u_\infty$ , isto é,  $u=0,99u_\infty$ . O lugar geométrico destes pontos, onde  $u=0,99u_\infty$ , é a camada limite cinética  $\delta(x)$ .

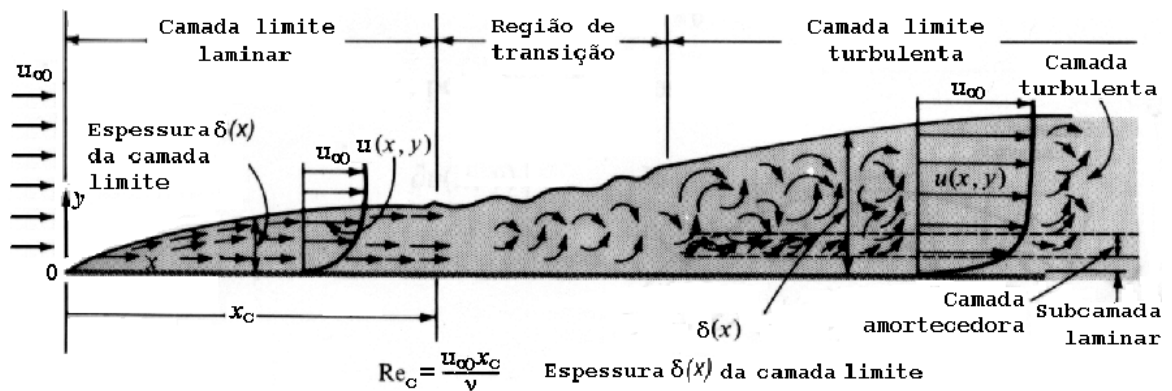


Figura 2.34: Conceito de camada limite no escoamento sobre uma placa plana.

Com o conceito de camada limite cinética, assim introduzido no escoamento de uma placa plana, o campo do escoamento pode ser dividido em duas regiões distintas:

- 1) na região da camada limite, a componente axial da velocidade  $u(x,y)$  varia rapidamente com a distância  $y$  à face da placa; portanto, os gradientes de temperatura e as tensões de cisalhamento são grandes;



2) na região fora da camada limite, na região de escoamento potencial, os gradientes de velocidade e as tensões de cisalhamento são desprezíveis.

Na figura 2.34, pode-se examinar o comportamento do escoamento na camada limite em função da distância  $x$  medida a partir da borda frontal da placa. A característica do escoamento é governada pelo valor da grandeza chamada número de Reynolds. No escoamento sobre uma placa plana, como está na figura 2.34, este número é definido por:

$$Re_x \equiv \frac{u_\infty x}{\nu} \quad (2.65)$$

onde:

$u_\infty$  = velocidade da corrente livre,  $[u_\infty] = \text{m/s}$ ;

$x$  = distância à borda frontal,  $[x] = \text{m}$ ;

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido,  $[\nu] = \text{m}^2/\text{s}$ .

A camada limite começa na borda frontal (isto é, em  $x=0$ ) da placa como uma camada limite laminar, na qual o escoamento permanece ordenado e as partículas do fluido se movem ao longo das linhas de corrente. Esse movimento ordenado continua ao longo da placa até que se atinge uma distância crítica, ou o número de Reynolds alcance um valor crítico. Depois de esse valor crítico ser atingido, os pequenos distúrbios no escoamento começam a ser amplificados, e flutuações no fluido começam a se desenvolver, o que caracteriza o final da camada limite laminar e o início da transição para a camada limite turbulenta.

O número de Reynolds crítico, na maior parte das finalidades analíticas, é geralmente tomado como:

$$Re_x \equiv \frac{u_\infty x}{\nu} \cong 5 \times 10^5 \quad (2.66)$$

Entretanto, esse valor crítico é fortemente dependente da rugosidade da superfície e do nível de turbulência da corrente livre. Por exemplo, com distúrbios muito grandes na corrente livre, a transição pode começar em um número de Reynolds tão baixo como  $10^5$ , e, nos escoamentos livres de perturbações, pode não começar até que o número de Reynolds atinja um valor de  $10^6$  ou mais. Mas, num escoamento sobre uma placa plana, a camada limite é sempre turbulenta para  $Re_x \geq 4 \times 10^6$ . Na camada limite turbulenta próxima da parede, há uma camada muito delgada, chamada subcamada laminar, onde o escoamento retém seu caráter laminar. Adjacente à subcamada laminar existe uma região chamada camada amortecedora, na qual há turbulência muito fina e a velocidade média axial aumenta rapidamente com a distância à superfície sólida. A camada amortecedora é seguida pela camada turbulenta, na qual há turbulência em alta escala e a velocidade muda relativamente pouco com a distância à parede.

A figura 2.35 mostra o conceito de camada limite no escoamento sobre um corpo curvo. Nesse caso, a coordenada  $x$  é medida ao longo da superfície curva do corpo; principiando pelo ponto de estagnação, e em cada posição  $x$ , a coordenada  $y$  é medida segundo a normal à superfície do corpo. A velocidade da corrente livre  $u_\infty(x)$  não é constante, mas varia com a distância ao longo da superfície

curva. O conceito de camada limite, discutido anteriormente, também se aplica a essa situação particular. A espessura da camada limite  $\delta(x)$  cresce com a distância ao longo da superfície. Entretanto, devido à curvatura da superfície, depois de uma certa distância  $x$ , o perfil da velocidade  $u(x,y)$  mostra um ponto de inflexão, isto é,  $\partial u/\partial y$  se anula na superfície do sólido. Além do ponto de inflexão, há uma inversão do escoamento, e diz-se que a camada limite está descolada da superfície do sólido. Além do ponto de inversão do fluxo, os padrões do fluxo são muito complicados e o conceito da camada limite não é mais aplicável.

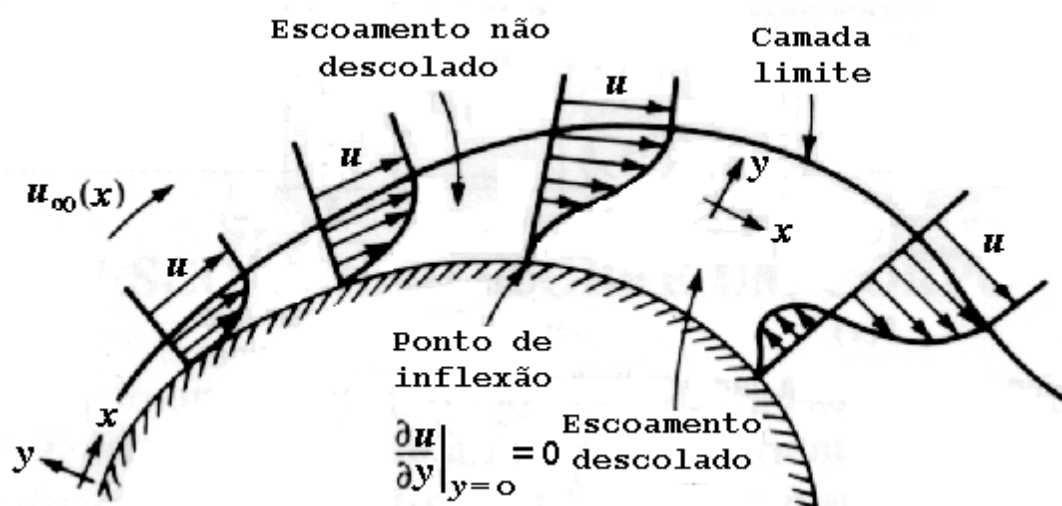


Figura 2.35: Conceito de camada limite no escoamento sobre um corpo curvo e a separação do fluxo.

Análogo ao conceito de camada limite cinética, pode-se imaginar o desenvolvimento de uma camada limite térmica ao longo da placa, associada ao perfil de temperatura no fluido. Para ilustrar o conceito, considera-se um fluido a uma temperatura uniforme  $T_{\infty}$  que escoia sobre uma placa plana

mantida a uma temperatura constante  $T$ . Sejam  $x$  e  $y$  os eixos coordenados paralelo e perpendicular à superfície da placa, respectivamente, como ilustrado na figura 2.36. Define-se a temperatura adimensional  $\theta_T(x, y)$  como:

$$\theta_T(x, y) = \frac{T(x, y) - T}{T_\infty - T} \quad (2.67)$$

onde:

$T(x, y)$  = temperatura local no fluido

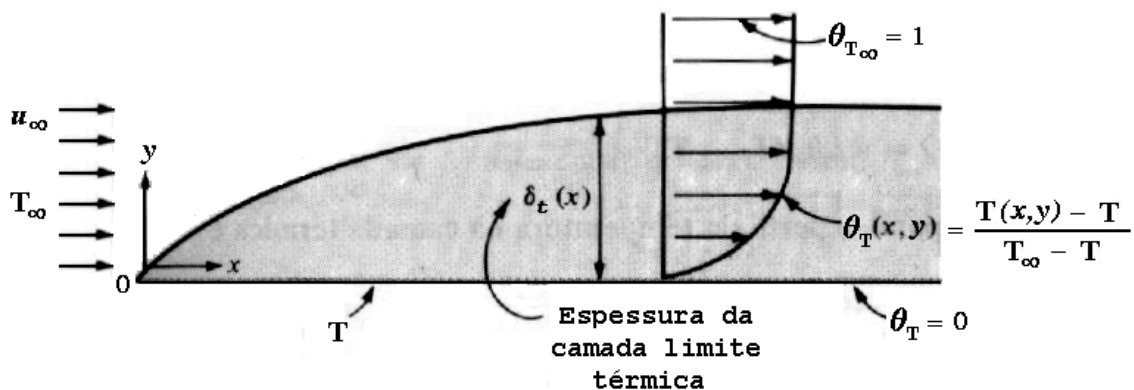


Figura 2.36: Conceito de camada limite térmica no escoamento de um fluido quente sobre uma placa fria.

Na superfície da placa, a temperatura do fluido é igual à temperatura da parede, portanto  $\theta_T(x, y) = 0$  em  $y = 0$  (superfície da placa).

A distâncias suficientemente grandes da placa, a temperatura do fluido é a mesma  $T_\infty$ ; então  $\theta_T(x, y) \rightarrow 1$  à medida que  $y \rightarrow \infty$ .

Por isso, em cada posição  $x$  ao longo da placa, pode-se imaginar uma posição  $y=\delta(x)$  no fluido onde  $\theta_T(x,y)$  seja igual a  $0,99$ . O lugar geométrico desses pontos onde  $\theta_T(x,y)=0,99$  é chamado a camada limite térmica  $\delta(x)$ .

### 3°) Radiação

Viu-se que a transferência de calor pode acontecer através de um meio material estático, que é a condução, ou em movimento, isto é, convecção. A transferência de calor por radiação é um mecanismo que prescinde da existência do meio material. Todos os corpos emitem continuamente energia em virtude da sua temperatura; a energia assim emitida é a radiação térmica. A energia da radiação emitida por um corpo é transmitida no espaço em forma de ondas eletromagnéticas, de acordo com a clássica teoria eletromagnética de Maxwell; ou na forma de fótons discretos, ou quanta, de energia, conforme a hipótese de Max Planck. Ambos os conceitos foram utilizados na investigação da transferência radiante do calor. Por exemplo, os resultados obtidos a partir da teoria eletromagnética são usados para prever as propriedades radiantes dos materiais, enquanto os resultados do conceito de Planck são empregados para prever a grandeza da energia radiante emitida por um corpo a uma dada temperatura.

A emissão ou absorção de energia radiante por um corpo é um processo de massa, isto é, a radiação, que se origina no interior do corpo, é emitida através da superfície. Inversamente, a radiação incidente na superfície de um corpo penetra até as profundezas do meio, onde é atenuada.

Quando uma grande proporção da radiação incidente é atenuada a uma distância muito pequena da superfície, pode-se falar da radiação como absorvida ou emitida pela superfície. Por exemplo, a radiação térmica incidente numa superfície metálica é atenuada ao longo da distância de uns poucos ångströms da superfície. Por isso, os metais são opacos à radiação térmica.

A rigor a radiação é mais eficiente no vácuo. É somente no vácuo que a radiação se propaga absolutamente sem nenhuma atenuação. Também o ar atmosférico de um cômodo, para todas as finalidades práticas, é considerado transparente à radiação térmica, pois a atenuação da radiação pelo ar é insignificante, a não ser numa camada com vários quilômetros de espessura. Entretanto, gases como o dióxido de carbono ou o monóxido de carbono absorvem a radiação térmica em certas faixas de comprimentos de onda; por isso, são semitransparentes à radiação térmica. Um corpo é considerado semitransparente à radiação térmica quando parte de radiação incidente sobre ele é absorvida, parte refletida e o restante é transmitido.

Deve-se ressaltar que todo corpo que esteja a uma temperatura superior ao zero absoluto emite calor sob a forma de radiação. Também um corpo absorve a radiação que sobre ele incide.

### 2.1.5.1 Equilíbrio Térmico

A maior parte da transferência de calor para a superfície do aço externo é por radiação e a intensidade da radiação é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta. Nas equações seguintes, o subíndice "z" refere-se às chamas externas, "s" ao aço externo, "f" ao incêndio dentro da edificação e "a" ao ar ambiente externo. As temperaturas em tais locais são mostradas na figura 2.37.

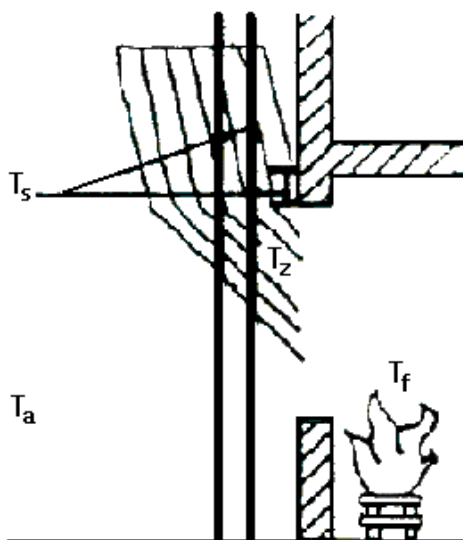


Figura 2.37: Localização das temperaturas

Nas equações seguintes,  $T_s$  indica uma temperatura média através da seção.

Conforme apresentado por Law (3), se uma superfície de aço externo estiver envolvida em chamas, aquecida pela radiação e convecção das chamas e ainda aquecida pela radiação das aberturas da edificação em incêndio, o equilíbrio de calor

por unidade de área de superfície é dado pela seguinte equação:

$$\alpha_z(T_z - T_s) + \varepsilon_z \varepsilon_s \sigma (T_z^4 - T_s^4) + \varepsilon_f (1 - \varepsilon_z) \varepsilon_s \phi_f \sigma (T_f^4 - T_s^4) +$$

$$(2.68)$$

$$+ (1 - \varepsilon_z) \varepsilon_s (1 - \phi_f) \sigma (T_a^4 - T_s^4) = \frac{Mc_s}{p_s} \frac{dT_s}{dt} + \kappa$$

onde:

$\sigma$  = constante de Stefan - Boltzmann, cujo valor é

$$56,7 \times 10^{-12} \text{ kW / (m}^2 \cdot \text{° C}^4\text{)};$$

$\alpha_z$  = coeficiente de transferência de calor por

convecção da chama,  $[\alpha_z] = \text{ kW / (m}^2 \cdot \text{° C)};$

$\varepsilon$  = emissividade, adimensional;

$\phi$  = fator de configuração, adimensional;

$\kappa$  = calor perdido por condução,  $[\kappa] = \text{ kW / m}^2;$

$c$  = calor específico,  $[c] = \text{ kJ / (kg}^\circ\text{C)}.$

Na equação 2.68,  $\alpha_z (T_z - T_s)$  representa a taxa de calor proveniente da transferência de calor por convecção da chama. O valor de  $\alpha_z$ , coeficiente de transferência de calor, dependerá da temperatura e da velocidade da chama e também da geometria da superfície do aço. Desde que a velocidade seja conhecida,  $\alpha_z$  pode ser obtido a partir de textos normatizados.  $\alpha_z$  pode não ser conhecido com grande precisão, mas já que a maior parte do calor é transferida por radiação, o erro será pequeno.



$\varepsilon_z \varepsilon_s \sigma (T_z^4 - T_s^4)$  representa a taxa de calor por radiação da chama. A emissividade da chama,  $\varepsilon_z$ , dependerá da espessura da mesma. A emissividade da superfície da peça,  $\varepsilon_s$ , será alta, da ordem de 0,9 e para os cálculos poderá ser tomada como unitária (uma hipótese conservadora). Desde que  $\varepsilon_z$  seja conhecida, a transferência de calor pode ser estimada.

$\varepsilon_f (1 - \varepsilon_z) \varepsilon_s \phi_f \sigma (T_f^4 - T_s^4)$  representa a taxa de calor por radiação das janelas e outras aberturas da edificação em incêndio. A emissividade do incêndio dentro da edificação,  $\varepsilon_f$ , é alta e pode ser tomada como unitária. Parte da radiação será absorvida pela chama e a fração que é transmitida é dada por  $(1 - \varepsilon_z)$ . O fator de configuração,  $\phi_f$ , das janelas em relação à superfície dependerá do tamanho e do formato das janelas e da posição da peça estrutural. O seu cálculo será apresentado mais adiante. Desde que  $\varepsilon_z$  seja conhecida, a transferência de calor poderá ser estimada.

$(1 - \varepsilon_z) \varepsilon_s (1 - \phi_f) \sigma (T_a^4 - T_s^4)$  representa a taxa de calor por radiação da vizinhança à temperatura ambiente do ar e, se  $T_a$  for menor que  $T_s$ , a expressão terá um valor negativo.

$\left( \frac{Mc_s}{p_s} \right) \frac{dT_s}{dt}$  representa a taxa de calor ganho por unidade de área de superfície. A massa por unidade de comprimento,  $M$ , dividida pelo perímetro,  $p_s$ , fornece a massa por unidade de área de superfície.

$K$  representa a taxa de calor perdido por condução através da peça de aço. Entretanto, nas peças envolvidas pelas chamas, o gradiente de temperatura será provavelmente pequeno e, para estes cálculos, como hipótese, este termo será desprezado.

$\sigma T_a^4$  é pequeno em relação às demais parcelas e pode ser desprezado.

Logo, levando-se em conta as hipóteses descritas anteriormente, a relação 2.68 pode ser simplificada e escrita da seguinte forma:

$$\alpha_z(T_z - T_s) + \epsilon_z \sigma T_z^4 + (1 - \epsilon_z) \phi_f \sigma T_f^4 - \sigma T_s^4 = \frac{Mc_s dT_s}{p_s dt} \quad (2.69)$$

Para condições de estado estacionário, o segundo membro da equação 2.69 é nulo, uma vez que  $\frac{dT_s}{dt} = 0$ .

Considerando-se uma peça envolvida em chamas, o Eurocode (2) apresenta a equação 2.70a, de equilíbrio térmico, para o cálculo da temperatura média do aço  $T_s$ .

$$\sigma T_s^4 + \alpha_z T_s = I_z + I_f + \alpha_z T_z \quad (2.70a)$$

Ajusta-se a equação 2.70a para graus Celsius, ficando:

$$\sigma(T_s + 273,15)^4 + \alpha_z(T_s + 273,15) = I_z + I_f + \alpha_z(T_z + 273,15) \quad (2.70b)$$

onde:

$T_z$  = temperatura das chamas,  $[T_z] = ^\circ\text{C}$ ;

$I_z$  = fluxo de calor por radiação da chama,  $[I_z] = \text{kW/m}^2$ ;

$I_f$  = fluxo de calor por radiação das aberturas correspondentes.  $[I_f] = \text{kW/m}^2$ .

O fluxo de calor por radiação,  $I_z$ , proveniente das chamas, deve ser determinado de acordo com a situação e o tipo de peça, como a seguir:

- pilares não envolvidos por chamas;
- vigas não envolvidas por chamas;
- pilares envolvidos por chamas;
- vigas totalmente ou parcialmente envolvidas por chamas.

Outros casos podem ser tratados analogamente, usando-se as adaptações apropriadas dos quatro tipos anteriores citados. O coeficiente de transferência de calor por convecção,  $\alpha_z$ , deve ser obtido do item 2.1.4.1.1, de acordo com a condição apropriada ("ventilação não forçada" ou "ventilação forçada"), considerando-se uma dimensão média da seção transversal  $d = (d_1 + d_2)/2$ .

O fluxo de calor por radiação,  $I_f$ , proveniente de uma abertura, deve ser determinado do seguinte modo:

$$I_f = \phi_f \varepsilon_f (1 - a_z) \sigma (T_f + 273,15)^4 \quad (2.71)$$

onde:

$\phi_f$  = fator de configuração total da peça para transferência de calor por radiação da abertura;

$\varepsilon_f$  = emissividade da abertura, igual a unidade;

$a_z$  = absorptividade das chamas;

$T_f$  = temperatura do incêndio,  $[T_f] = ^\circ\text{C}$ .

A absorptividade das chamas,  $a_z$ , deve ser determinada assim como o valor de  $I_z$ , ou seja, de acordo com a situação e o tipo de peça, conforme o apropriado.

Se a superfície do aço estiver fora da corrente de convecção das chamas e gases quentes, o equilíbrio de calor é similarmente apresentado por Law (3) através da equação 2.72.

$$\varepsilon_z \phi_z \sigma T_z^4 + \phi_f \sigma T_f^4 - \sigma T_s^4 - \alpha_s (T_s - T_a) = \frac{Mc_s dT_s}{p_s dt} \quad (2.72)$$

$\varepsilon_z \phi_z \sigma T_z^4$  representa a transferência de calor por radiação da chama. O fator de configuração da chama,  $\phi_z$ , em relação à peça estrutural dependerá do tamanho e formato da frente da chama e de sua posição em relação às faces da peça. Já que o valor de  $T_z$  varia ao longo do eixo da chama, deve-se estimar um valor médio.

$\alpha_s (T_s - T_a)$  representa o calor perdido por convecção para a vizinhança e pode ser tomado como  $\alpha_z (T_s - T_a)$  pela maior parte das situações práticas.

Como mencionado, para condições de estado estacionário, o segundo membro da equação 2.72 é zero. Na prática as condições de estado estacionário podem não ser atingidas, mas se elas forem supostas, a temperatura máxima do aço será calculada e uma solução conservadora será alcançada. Entretanto, quando a duração do flamejamento for pequena e/ou o valor de  $M/p_s$  for alto, poderão existir condições de transição e  $T_s$  poderá ser calculado por métodos iterativos usando-se as equações.2.71 ou 2.72 conforme a necessidade.

Antes dos cálculos serem realizados, é necessário estimar a velocidade da chama a fim de se determinar  $\alpha_z$  para transferência por convecção e, para o cálculo da transferência por radiação, determina-se a emissividade e a temperatura média das chamas. Os valores medidos da transferência de calor das chamas em ensaios com escala natural foram examinados para ajudar a estabelecer um modelo realístico.

Para uma peça não envolvida em chamas, o Eurocode 3 Part 1-2 (2) determina que a temperatura média do aço  $T_s$  deve ser obtida a partir da solução da seguinte equação de equilíbrio térmico:

$$\sigma T_s^4 + \alpha_z T_s = \Sigma I_z + \Sigma I_f + 293\alpha_z \quad (2.73a)$$

Ao ajustar a equação 2.73a para graus Celsius, obtém-se a equação 2.73b:

$$\sigma(T_s + 273,15)^4 + \alpha_z(T_s + 273,15) = \Sigma I_z + \Sigma I_f + 293\alpha_z \quad (2.73b)$$

#### 2.1.5.1.1 Convecção das Chamas e Gases Quentes

O coeficiente de transferência de calor convectivo,  $\alpha_z$ , depende do fluxo de massa de gás por unidade de área,  $u_z \rho_z$ , fornecido pelos gases quentes e do tamanho e orientação da superfície receptora; o coeficiente pode ser obtido das relações entre o número de Nusselt,  $N_u$ , e o número de Reynolds,  $R_e$ , sendo ambos valores adimensionais, onde:

$$N_u = \frac{\alpha_z d}{K_z} \quad (2.74)$$

$$R_e = \frac{u_z \rho_z d}{\mu_z}$$

onde:

$d$  = comprimento característico da superfície [ $d$ ] = m;

$K_z$  = condutividade térmica do gás [ $K_z$ ] = kW/m°C;

$\rho_z$  = densidade do gás [ $\rho_z$ ] = kg/m<sup>3</sup>;

$\mu_z$  = viscosidade do gás [ $\mu_z$ ] = kg/m.s.

As propriedades térmicas do gás são tomadas à temperatura de "película", que é a média da temperatura entre os gases quentes e a superfície.

Para o fluxo perpendicular a um tubo de diâmetro  $d$ :

$$N_u = 0,24 R_e^{0,6} \quad (2.75)$$

Para fluxo a um ângulo de  $45^\circ$ , o valor da constante na equação 2.75 é cerca de 0,18 e para fluxo paralelo cerca de 0,12. A equação 2.75 é normalmente apropriada tanto para pilares quanto para vigas.

#### 2.1.5.1.1.1 Ventilação Natural

Quando há ventilação natural, um pilar ou viga somente ficará exposto à transferência de calor por convecção se ele (ou ela) estiver próximo à edificação, onde o fluxo de massa por unidade de área possa ser tomado como aproximadamente o mesmo que o da janela. O fluxo de massa que sai pela janela depende dos processos pelos quais o ar entra no compartimento, isto é, se a ventilação é natural ou forçada. Para um incêndio de ventilação controlada o fluxo é aproximadamente  $6,4R$ . Desde que o plano neutro, acima do qual as chamas e gases quentes deixam o compartimento, esteja cerca de  $2h/3$  abaixo do topo da janela, o fluxo de massa por unidade de área é dado por:

$$u_z \rho_z \approx 9,6 \frac{R}{A_w} \quad (2.76)$$

e o número de Reynolds é:

$$R_e = \frac{9,6Rd}{A_w \mu_z} \quad (2.77)$$

As equações 2.74, 2.75, 2.76 e 2.77 são combinadas dando:

$$\alpha_z = 0,93K_z \left[ \frac{R}{\mu_z A_\omega} \right]^{0,6} \left[ \frac{1}{d} \right]^{0,4} \quad (2.78)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção não é muito sensível à temperatura de película, ou seja, seu valor sofre apenas pequenas variações. Law (3) adota, então, uma temperatura representativa, tirada em laboratório, aproximadamente de 732°C. Substitui-se os valores de  $K_z$  e  $\mu_z$  na equação 2.78 e obtém-se a equação 2.79:

$$\alpha_z = 0,026 \left[ \frac{R}{A_\omega} \right]^{0,6} \left[ \frac{1}{d} \right]^{0,4} \quad (2.79)$$

Para um incêndio a queima-livre, a equação 2.79 superestima  $\alpha_z$  e seu uso fornece uma solução ligeiramente conservadora.

#### 2.1.5.1.1.2 Ventilação Forçada

Onde há uma significativa ventilação forçada, o fluxo de massa inclui também o ar suplementar e ele emergirá de toda a área da janela. Logo, para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção, o Eurocode 3 Part 1-2 (2) apresenta a equação 2.80:

$$\alpha_z = 0,0098 \left[ \frac{1}{d} \right]^{0,4} \left[ \frac{R}{A_\omega} + \frac{u}{1,6} \right]^{0,6} \quad (2.80)$$



Quando a estrutura de aço estiver distante da chama, ela perderá calor por convecção natural:

Para pilares:

$$\alpha_s = 0,0014 \left[ \frac{T_s - T_a}{d} \right]^{0,25} \quad (2.81)$$

Para vigas o coeficiente é similar: 0,0013.

Quando d exceder 0,3m:

$$\alpha_s = 0,002(T_s - T_a)^{0,25} \quad (2.82)$$

#### 2.1.5.1.2 Radiação das Chamas

Segundo Law (3), a partir de ensaios realizados em Borehamwood, de acordo com o que foi citado no item 2.1.2.4.3.10, foi possível medir o fluxo de calor das chamas emergentes. O valor medido do fluxo de calor foi denominado de  $I_z$  e, ao desprezar-se a transferência de calor por convecção, devido a esta ser pequena, chegou-se à seguinte relação:

$$I_z \simeq \epsilon_z \sigma T_z^4 \quad (2.83)$$

$\sigma T_z^4$  está plotado na figura 2.38, juntamente com as medidas de  $I_z$ . De acordo com Law (3), a reta inclinada fornece um

valor de  $\varepsilon_z$  igual a 0,3, conforme o valor adotado por Seigel, mostrando-se, assim, a validade destes dados.

Se a superfície estiver envolvida em chamas, a temperatura média radiante  $T_z$  poderá ser a temperatura local da chama ou uma temperatura média entre as várias temperaturas da chama, de acordo com as circunstâncias. Por exemplo, uma superfície de um pilar pode "acompanhar" uma espessura da chama, que varia da temperatura local  $T_\ell$  ao valor  $T_o$  na janela, sendo que uma outra superfície pode acompanhar uma espessura, que varia de  $T_\ell$  a  $T_x$ , no topo da chama. Supõe-se, portanto, que o valor de  $T_z$  deva ser tomado como o valor local ou o valor extremo, o que for maior.

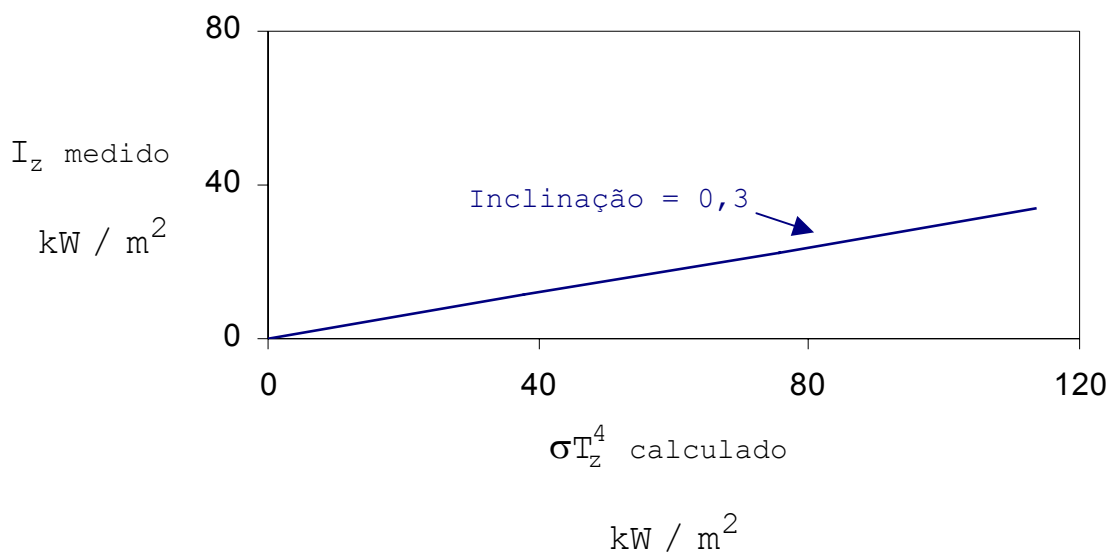


Figura 2.38: Fluxo de calor das chamas acima das janelas, em ensaios em escala natural, realizados em Borehamwood, comparado ao fluxo de calor calculado para as chamas com emissividade total

Se a superfície não estiver envolvida em chamas, ela "acompanha" uma frente da chama, que varia em temperatura de  $T_o$ , na janela, à  $T_x$  no topo da chama.

À uma grande distância, a temperatura média radiante,  $T_z$ , é dada por:

$$T_z^4 \approx \frac{T_o^4 + T_x^4}{2} \quad (2.84)$$

Próximo à frente da chama, a temperatura média radiante para o ponto na superfície, que recebe a taxa máxima de calor, é dada pela equação 2.85.

$$T_z^4 \approx T_o^4 \quad (2.85)$$

A equação 2.85 é uma boa aproximação para a maioria das situações práticas, ao considerar o caso de incêndio com ventilação forçada.

Para incêndios com ventilação natural, a radiação é recebida principalmente pela parte da chama acima da janela, sendo a parte inferior mais fina. Então, para uma grande distância, temos que:

$$T_z^4 \approx \frac{T_w^4 + T_x^4}{2} \quad (2.86)$$

e próximo:

$$T_z^4 \approx T_w^4 \quad (2.87)$$

onde:

$T_w$  = temperatura da chama na região oposta ao topo da janela.

A equação 2.87 é uma boa aproximação para grande parte das situações práticas, no caso de incêndios com ventilação natural.

A soma dos valores medidos para radiação da janela e da chama, no caso de incêndios com ventilação natural, são comparados na figura 2.39, aos valores calculados, de acordo com os métodos descritos. A comparação mostra que os cálculos tendem a superestimar a intensidade da radiação recebida, mas não a uma quantidade inaceitável.

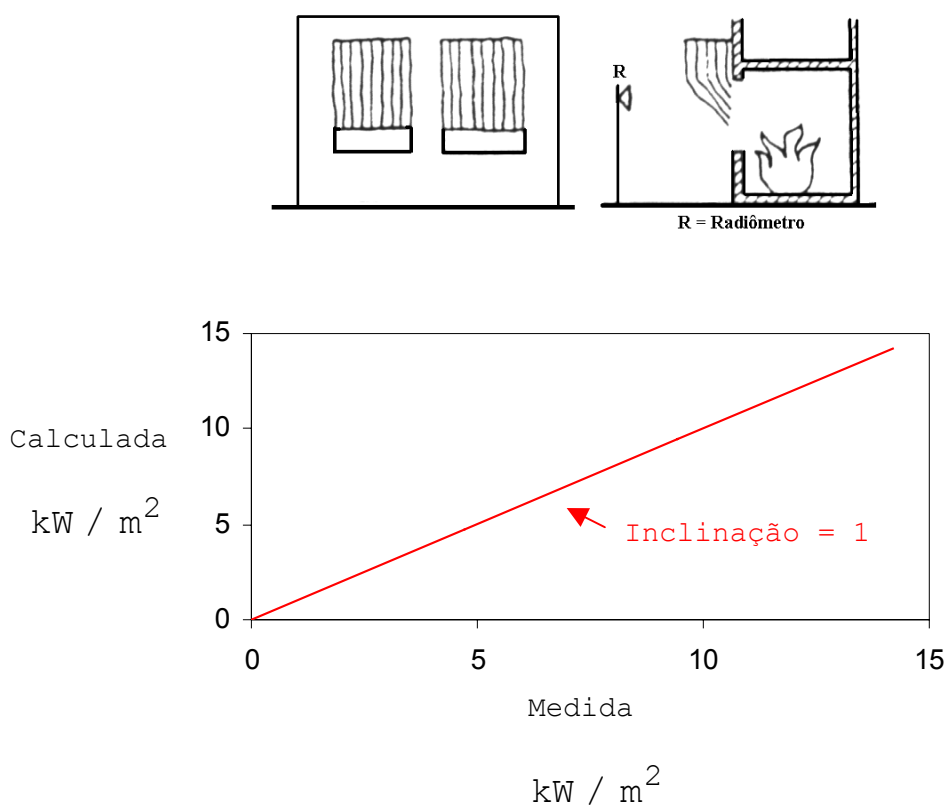


Figura 2.39: Soma da radiação da janela e da chama recebida por um radiômetro a 4,5m ou 6m de distância, em ensaios em escala natural, em Borehamwood

## 2.1.6 FATORES DE CONFIGURAÇÃO

Em primeiro lugar, deve-se introduzir o conceito de fator de configuração total. Portanto, esse item deve ser subdividido em dois itens: fator de configuração total e fator de configuração.

### 2.1.6.1 Fator de Configuração Total

Deve-se determinar o fator de configuração total,  $\phi_f$ , de uma peça, onde considera-se que haja transferência de calor por radiação, proveniente de uma abertura, utilizando-se a equação 2.88:

$$\phi_f = \frac{(C_1\phi_{f,1} + C_2\phi_{f,2})d_1 + (C_3\phi_{f,3} + C_4\phi_{f,4})d_2}{(C_1 + C_2)d_1 + (C_3 + C_4)d_2} \quad (2.88)$$

onde:

$\phi_{f,j}$  = fator de configuração da face  $j$  da peça para a abertura, conforme o quê será apresentado no item 2.1.6.2.1;

$d_j$  = dimensão da seção transversal da face  $j$  da peça;

$C_j$  = coeficiente de proteção da face  $j$  da peça, sendo que para uma face protegida  $C_j = 0$  e para uma face desprotegida  $C_j = 1$ .

Deve-se citar que o fator de configuração,  $\phi_{f,j}$ , da face de uma peça, da qual a abertura não é visível, deve ser tomado como zero.

O fator de configuração total,  $\phi_z$ , de uma peça, considerando-se transferência de calor por radiação de uma chama, deve ser determinado utilizando-se a equação 2.89, como a seguir:

$$\phi_z = \frac{(C_1\phi_{z,1} + C_2\phi_{z,2})d_1 + (C_3\phi_{z,3} + C_4\phi_{z,4})d_2}{(C_1 + C_2)d_1 + (C_3 + C_4)d_2} \quad (2.89)$$

onde:

$\phi_{z,j}$  = fator de configuração da face  $j$  da peça para a chama, de acordo com o quê será apresentado no item 2.1.6.2.1.

Os fatores de configuração,  $\phi_{z,j}$ , de cada face de uma peça, considerando-se transferência de calor por radiação das chamas, devem ser baseados nas dimensões retangulares equivalentes das chamas. As dimensões e localizações dos retângulos equivalentes, que representam a frente e os lados de uma chama, para o objetivo aqui apresentado, devem ser determinadas como dado no item 2.2 para os pilares e no item 2.3 para as vigas. Para quaisquer outros propósitos, as dimensões da chama devem ser obtidas, conforme já apresentado a partir do item 2.1.2.4.

Deve-se citar que o valor de  $\phi_{z,j}$ , ao considerar a face de uma peça, da qual a chama não é visível, deve ser tomado igual a zero.

Sabe-se que uma face da peça pode ser protegida por um anteparo e que, uma face da peça que estiver imediatamente adjacente à parede do compartimento, pode também ser tratada como protegida, desde que nesta parte da parede não haja abertura. Logo, todas as outras faces da peça devem ser tratadas como sem proteção.

#### 2.1.6.2 Fator de Configuração

##### 2.1.6.2.1 *Fator de Configuração, Segundo o Eurocode 3 Part 1-2 (2)*

Conforme já visto, o item 2.1.6.1 apresenta a definição de fator de configuração,  $\phi$ . Entretanto, vale lembrar que esse termo mede a fração do calor total transmitido por radiação, que sai de uma superfície irradiante e chega a uma superfície receptora. Seu valor depende das dimensões da superfície irradiante, da distância entre a superfície irradiante e a superfície receptora e de suas orientações relativas.

Neste item, assume-se que todas as superfícies irradiantes sejam da forma retangular. Elas abrangem as janelas e outras aberturas nas paredes do compartimento incendiado, além de abrangerem também as superfícies de chamas retangulares equivalentes, conforme o item 2.1.6.1.

Para o cálculo do fator de configuração, sendo dada uma determinada situação, deve-se primeiramente projetar um invólucro retangular em volta da seção transversal da peça, que receberá calor transferido por radiação, como ilustrado

na figura 2.40. O valor de  $\phi$  deve ser então determinado em um ponto central, P, existente em cada face deste retângulo.

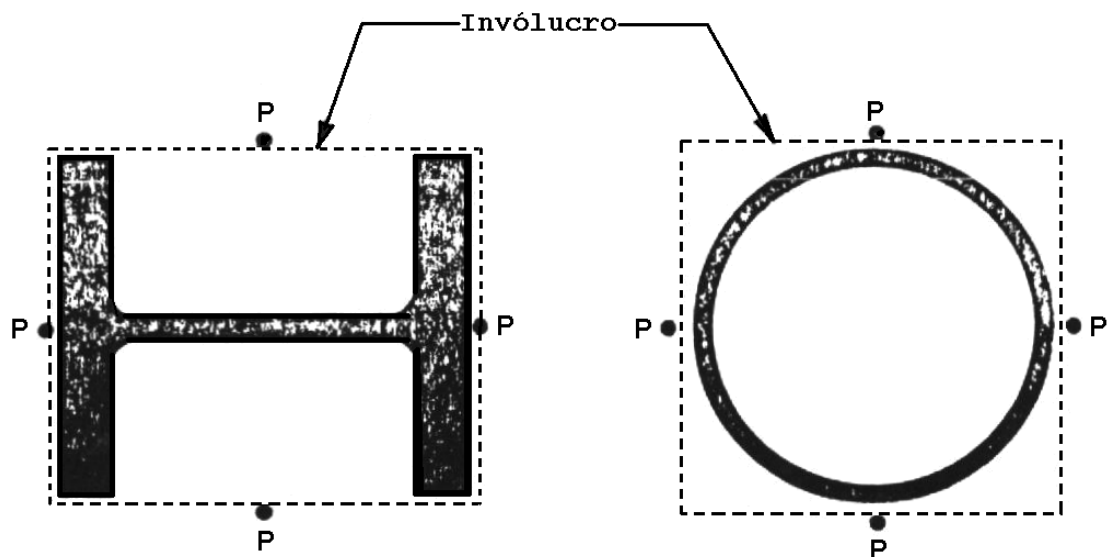


Figura 2.40: Invólucro ao redor das superfícies receptoras

O fator de configuração para cada superfície receptora deve ser determinado como sendo a soma das contribuições de cada uma das regiões da superfície irradiante (normalmente quatro), que são visíveis a partir do ponto P, na superfície receptora, como indicado nas figuras 2.41 e 2.42. Essas regiões devem ser definidas em relação ao ponto X, onde uma linha horizontal perpendicular à superfície receptora se cruza com o plano que contém a superfície irradiante. Não deve-se considerar as contribuições de algumas regiões, tais como as regiões que aparecem sombreadas na figura 2.42, as quais não são visíveis a partir do ponto P.



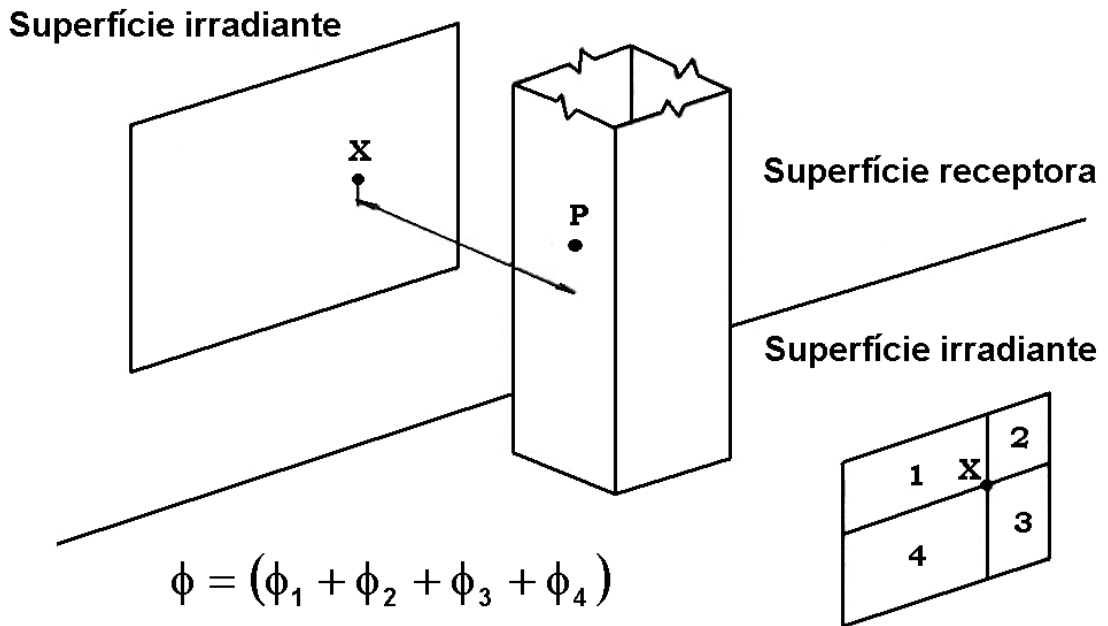


Figura 2.41: Superfície receptora em um plano paralelo ao plano da superfície irradiante

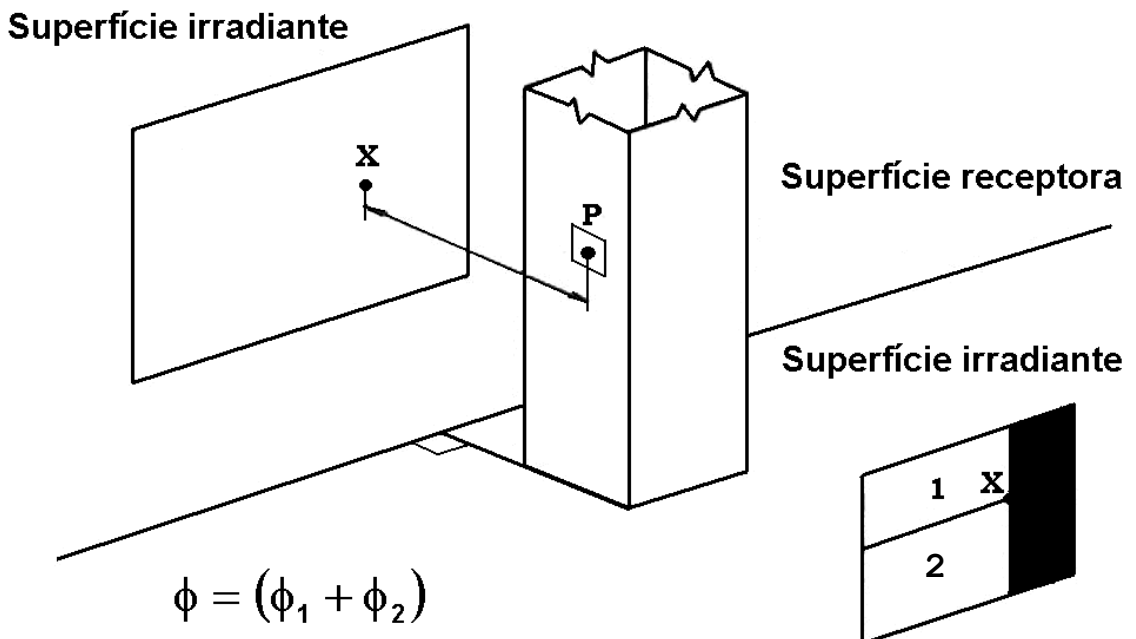


Figura 2.42: Superfície receptora perpendicular ao plano da superfície irradiante

Se o ponto X estiver fora da superfície irradiante, o fator de configuração efetivo deve ser determinado adicionando-se as contribuições dos dois retângulos, que se estendem de X até o lado mais afastado da superfície irradiante e então subtraindo-se as contribuições dos dois retângulos, que se estendem de X até o lado mais próximo da superfície irradiante.

A contribuição de cada região deve ser determinada como a seguir:

- superfície receptora paralela à superfície irradiante:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{a}{(1+a^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left[ \frac{b}{(1+a^2)^{0,5}} \right] + \frac{b}{(1+b^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left[ \frac{a}{(1+b^2)^{0,5}} \right] \right\} \quad (2.90)$$

sendo:

$$a = h' / S'$$

$$b = \omega' / S'$$

onde:

$S'$  = distância de P até X;

$h'$  = altura da região na superfície irradiante;

$\omega'$  = largura da região irradiante.

Sendo que tais parâmetros podem ser observados nas figuras 2.44, 2.45, 2.46, 2.47 e 2.48 para o cálculo do fator de configuração, considerando-se cada caso em particular.

- superfície receptora perpendicular à superfície irradiante:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left\{ \tan^{-1}(a) - \frac{1}{(1 + b^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left[ \frac{a}{(1 + b^2)^{0,5}} \right] \right\} \quad (2.91)$$

- superfície receptora em um plano que forma um ângulo  $\theta$  com a superfície irradiante:

$$\begin{aligned} \phi = \frac{1}{2\pi} & \left\langle \tan^{-1}(a) - \frac{(1 - b \cos \theta)}{(1 + b^2 - 2b \cos \theta)^{0,5}} \tan^{-1} x \right. \\ & \times \left[ \frac{a}{(1 + b^2 - 2b \cos \theta)^{0,5}} \right] + \frac{a \cos \theta}{(a^2 + \sin^2 \theta)^{0,5}} \times \\ & \left. \times \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{(b - \cos \theta)}{(a^2 + \sin^2 \theta)^{0,5}} \right] + \tan^{-1} \left[ \frac{\cos \theta}{(a^2 + \sin^2 \theta)^{0,5}} \right] \right\} \right\rangle \quad (2.92) \end{aligned}$$

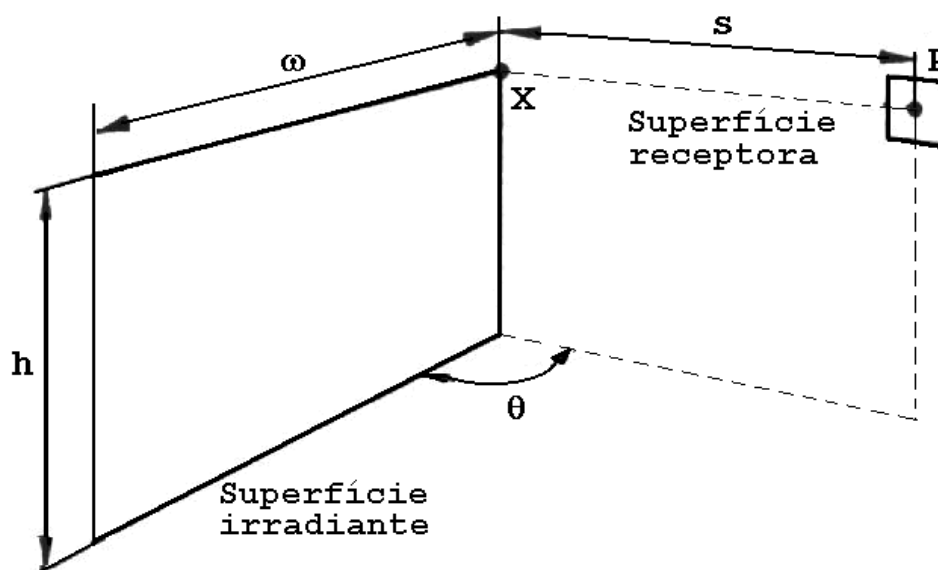


Figura 2.43: Superfície receptora em um plano de ângulo  $\theta$  com relação ao plano da superfície irradiante

#### 2.1.6.2.2 Fator de Configuração, Segundo o AISI (4)

##### 2.1.6.2.2.1 Pilar em Frente à Janela, para Todas as Condições de Ventilação

###### 2.1.6.2.2.1.1 Chama como Superfície Irradiante

O fator de configuração,  $\phi_z$ , considerando-se a chama como superfície irradiante, é dado pela seguinte equação geral:

$$\phi_z = \frac{(\phi_{z_1} + \phi_{z_2})d_1 + \phi_{z_3}d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (2.93)$$

onde:

$\phi_{z_1}$  = fator de configuração a partir da chama até a face 1 do pilar: (perpendicular à janela) - face direita;

$\phi_{z_2}$  = fator de configuração a partir da chama até a face 2 do pilar: (perpendicular à janela) - face esquerda;

$\phi_{z_3}$  = fator de configuração a partir da chama até a face 3 do pilar: (paralela à janela, a parte frontal);

$d_1$  = comprimento das faces do pilar perpendiculares à janela;

$d_2$  = comprimento das faces do pilar paralelas à janela;

Logo, o AISI (4) conclui que a equação 2.93 fornece o fator de configuração total para o pilar, tendo a chama como superfície irradiante, feita a média através do perímetro do pilar,  $2(d_1+d_2)$ .

Na equação 2.93, assume-se que três faces são "visíveis" à chama e também que o invólucro retangular é orientado pela dimensão  $d_2$ , paralela à frente da janela.

Há uma série de passos a serem seguidos para a obtenção dos valores necessários à utilização da fórmula 2.93.

Em primeiro lugar, devem-se calcular os parâmetros  $a$  e  $b$ , através das equações seguintes, da face 1 do pilar:

$$\begin{aligned} a &= h' / S_1' \\ b &= \omega_1' / S_1' \end{aligned} \tag{2.94}$$

onde os parâmetros da equação 2.94 estão ilustrados na figura 2.44.

No gráfico 2.1, encontra-se a curva de interseção dos valores de  $a$  e  $b$ . Lê-se, então, o fator de configuração total para a face 1,  $\phi_{z_1}$ , que se localiza na escala à esquerda do gráfico.

Para a face 2 do pilar, segue-se o mesmo caminho que o da face 1. Entretanto, aqui, usa-se a fórmula 2.95 e, no gráfico 2.1, obtém-se o fator de configuração total para a face 2,  $\phi_{z_2}$ :

$$a = h' / S_2' \quad (2.95)$$

$$b = \omega_2' / S_2'$$

onde a figura 2.44 ilustra os parâmetros da equação 2.95.

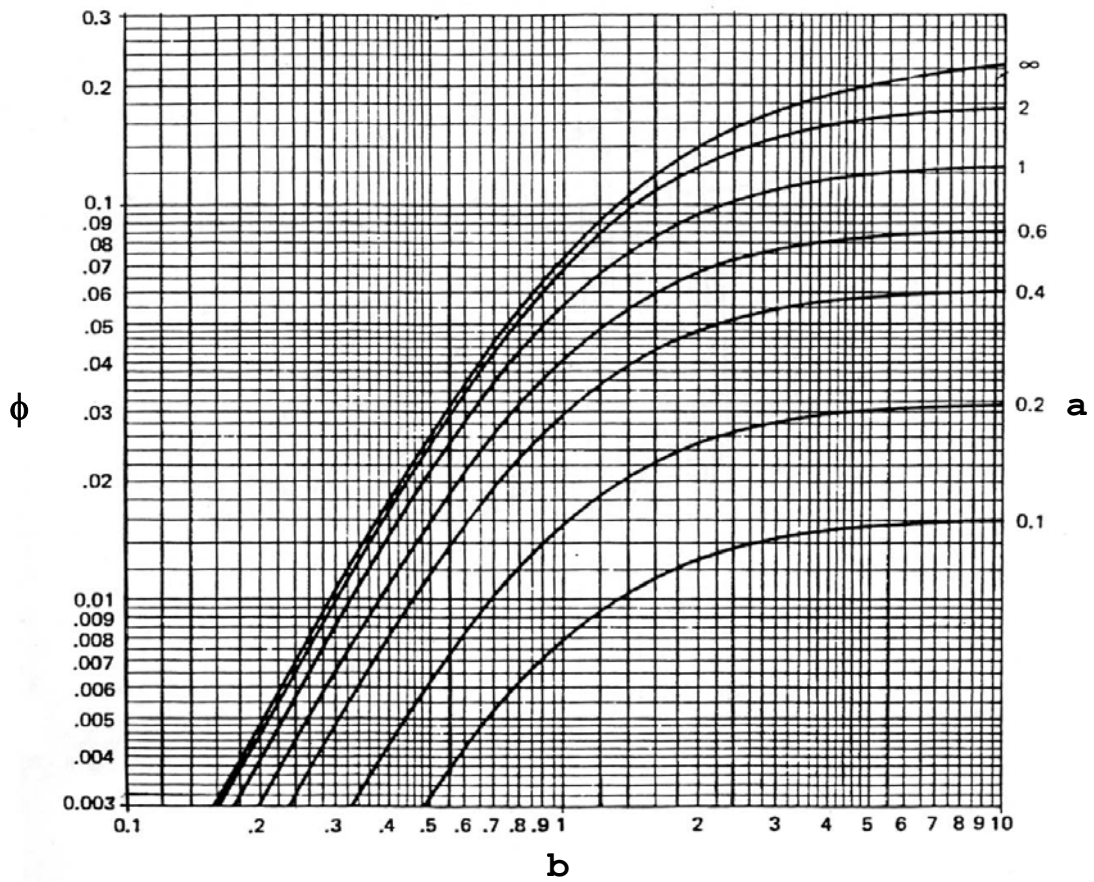


Gráfico 2.1: Fator de configuração considerando a superfície irradiante perpendicular à face do pilar em estudo, ou seja, um ângulo  $\theta = 90^\circ$

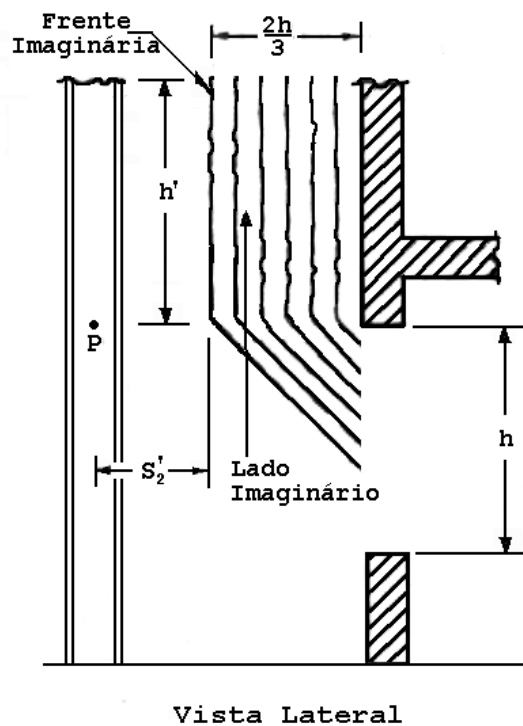
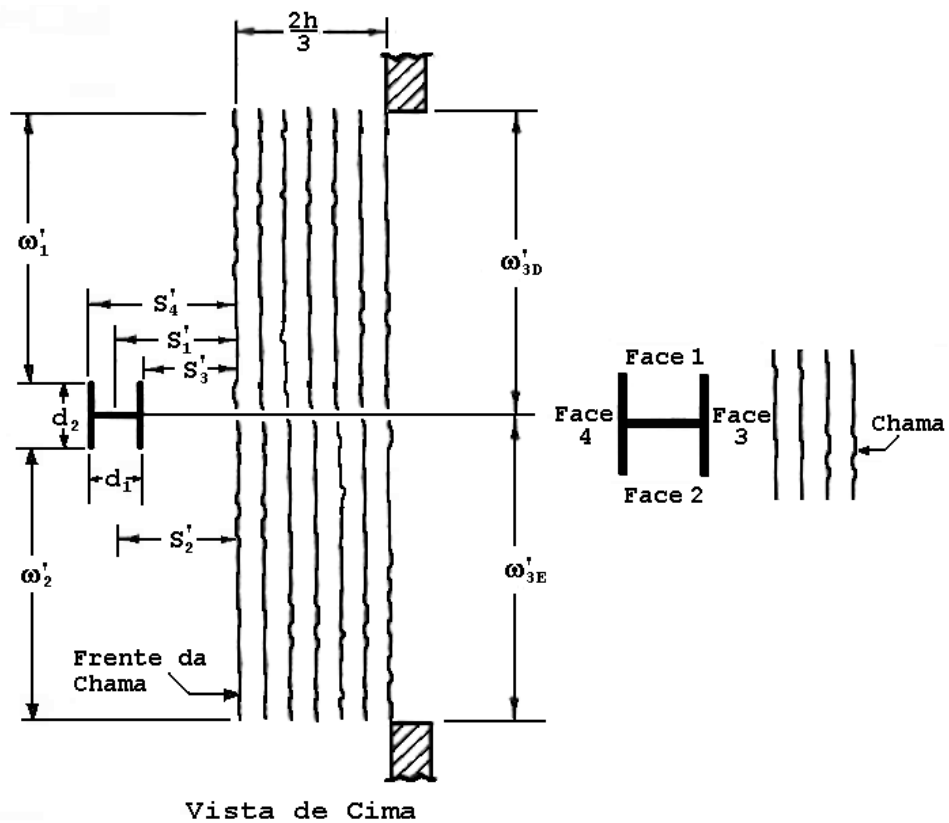


Figura 2.44: Localização e dimensões do pilar, ao considerá-lo em frente à janela, para todas as condições de ventilação, sendo a chama como superfície irradiante

Para a face 3, calcula-se a contribuição do lado direito da chama, utilizando-se a relação 2.96:

$$a = h' / S_3' \quad (2.96)$$

$$b = \omega_{3D}' / S_3'$$

onde os parâmetros  $h'$ ,  $S_3'$  e  $\omega_{3D}'$  encontram-se ilustrados na figura 2.44.

Com os valores de  $a$  e  $b$  determinados na equação 2.96, obtém-se, no gráfico 2.2, o valor de  $\phi_{z_{3D}}$ , que é o componente do fator de configuração para o lado 3, sendo dado pelo lado direito da chama.

Ainda para a face 3, calcula-se a contribuição do lado esquerdo da chama a partir da equação 2.97:

$$a = h' / S_3' \quad (2.97)$$

$$b = \omega_{3E}' / S_3'$$

O termo  $\omega_{3E}'$  está ilustrado no detalhe A da figura 2.44.

Utiliza-se o gráfico 2.2, ao entrar com os valores de  $a$  e  $b$  determinados na equação 2.97. Logo, obtém-se o valor de  $\phi_{z_{3E}}$ , que é o componente do fator de configuração para o lado 3, sendo dado pelo lado esquerdo da chama.



Calcula-se, então, o fator de configuração total para a face 3 a partir da equação seguinte:

$$\phi_{z_3} = \phi_{z_{3D}} + \phi_{z_{3E}} \quad (2.98)$$

Finalmente, agora que todos os parâmetros da equação 2.93 são conhecidos, calcula-se o fator de configuração,  $\phi_z$ , considerando-se todas as faces da peça, tendo-se a chama como superfície irradiante.

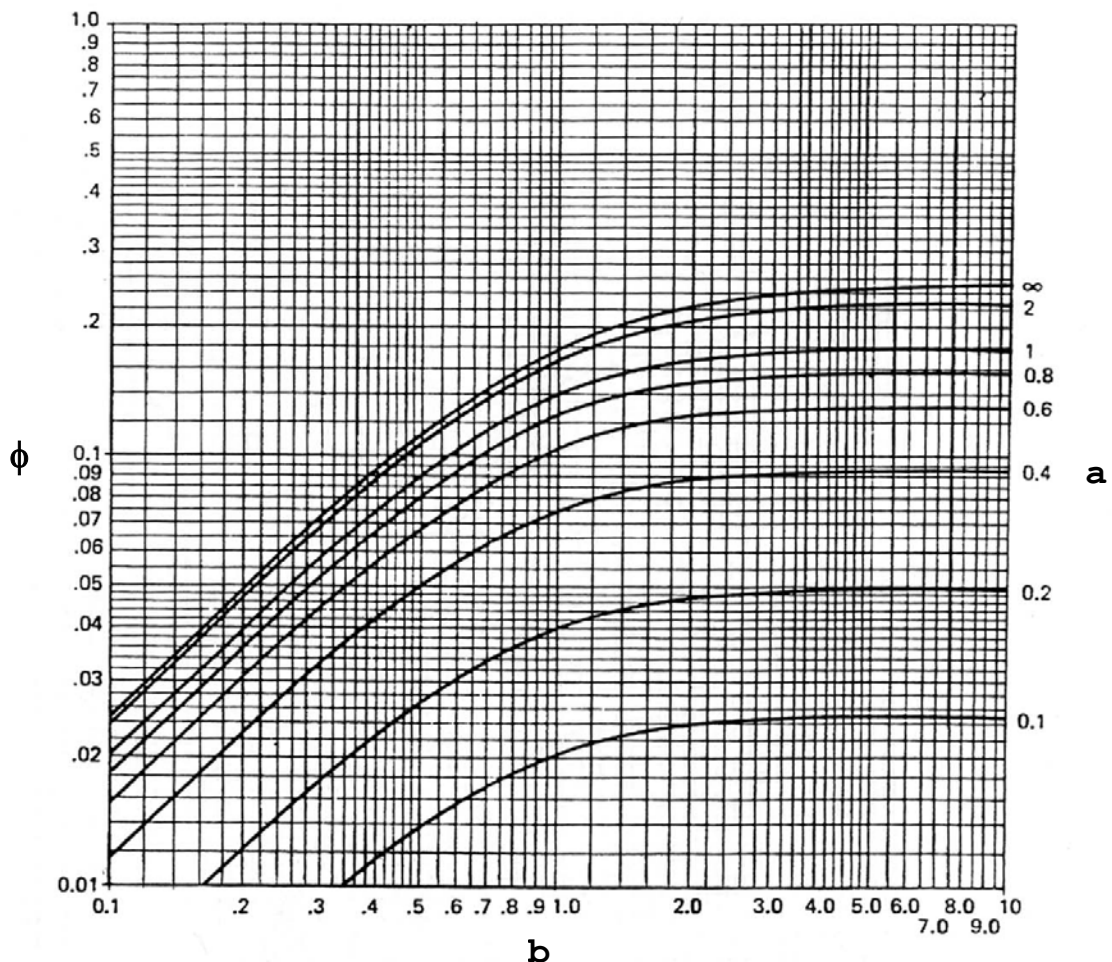


Gráfico 2.2: Fator de configuração considerando a superfície irradiante paralela à face do pilar em estudo

#### 2.1.6.2.2.1.2 Janela como Superfície Irradiante

A equação geral para esta condição é dada a seguir:

$$\phi_f = \frac{(\phi_{f_1} + \phi_{f_2})d_1 + \phi_{f_3}d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (2.99)$$

onde:

$\phi_f$  = fator de configuração total, considerando-se a janela como superfície irradiante;

$\phi_{f_1}$  = fator de configuração considerando-se a janela como superfície irradiante: face 1 do pilar;

$\phi_{f_2}$  = fator de configuração considerando-se a janela como superfície irradiante: face 2 do pilar;

$\phi_{f_3}$  = fator de configuração considerando-se a janela como superfície irradiante: face 3 do pilar;

$d_1, d_2$  = largura e profundidade do pilar.

Neste item, assume-se que a dimensão  $d_2$  do pilar esteja alinhada paralelamente à janela e que o pilar possa ser representado como uma caixa retangular. Os fatores de configuração para outras orientações podem ser determinados, de acordo com o necessário, de maneira similar.

Deve-se observar que, para o fator de configuração, é feita uma média sobre todo o perímetro do pilar,  $2(d_1+d_2)$ , e não apenas sobre as superfícies aquecidas.

Assume-se que o valor do termo  $\phi_{f_4}$  seja zero, uma vez que ele não aparece na equação 2.99. Isso ocorre devido à suposição de orientação paralela, ou seja, a parte de trás do pilar (face 4) não “vê” a janela.

Antes de se utilizar a equação 2.99, devem-se obter os parâmetros nela especificados.

A figura 2.45 mostra as dimensões necessárias para o cálculo do fator de configuração, levando-se em conta a janela do compartimento como superfície irradiante.

Deve-se obter o valor de  $\phi_{f_1}$  no gráfico 2.1, considerando-se um ângulo  $\theta = 90^\circ$ . Para utilização do gráfico, devem-se conhecer os valores de a e b, que são calculados através da fórmula 2.94.

O fator de configuração total para a face 2,  $\phi_{f_2}$ , também é obtido no gráfico 2.1, porém deve-se utilizar a relação 2.95 para a obtenção dos valores de a e b.

Para a face 3, calcula-se o componente do fator de configuração do seu lado direito,  $\phi_{f_{3D}}$ , no gráfico 2.2, a partir dos valores de a e b determinados na equação 2.96. Em seguida, calcula-se o componente do seu lado esquerdo,  $\phi_{f_{3E}}$ , no gráfico 2.2, a partir dos valores de a e b determinados na equação 2.97. Logo, o fator de configuração total para a face 3 é obtido como a seguir:

$$\phi_{f_3} = \phi_{f_{3D}} + \phi_{f_{3E}} \quad (2.100)$$

Finalmente, agora que todos os parâmetros da equação 2.99 são conhecidos, calcula-se o fator de configuração,  $\phi_f$ , considerando-se todas as faces da peça, tendo-se a janela do compartimento como superfície irradiante.

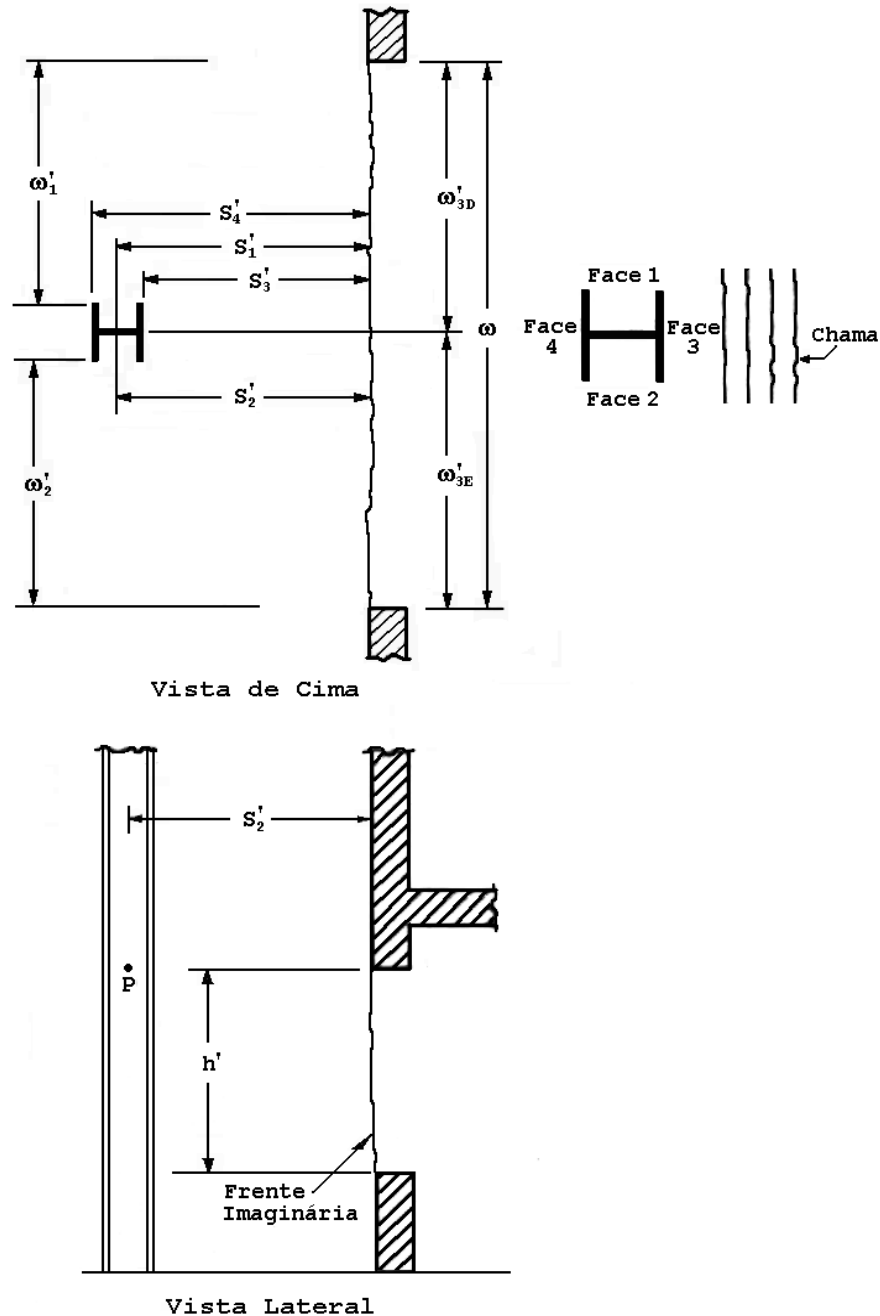


Figura 2.45: Localização e dimensões do pilar, ao considerá-lo em frente à janela, para todas as condições de ventilação, sendo a janela como superfície irradiante

## 2.1.6.2.2.2 Pilar ao lado da Janela sob Condições de Ventilação Natural

### 2.1.6.2.2.2.1 Chama como Superfície Irradiante

A principal diferença entre esta condição e a condição na qual o pilar se localiza em frente à janela é que, aqui, torna-se possível ter transferência de calor por radiação para a face de trás (face 4) do pilar. Logo, o fator de configuração, considerando-se a chama em direção ao pilar é dado por:

$$\phi_z = \frac{(\phi_{z_1} + \phi_{z_2})d_1 + (\phi_{z_3} + \phi_{z_4})d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (2.101)$$

onde:

$\phi_z$  = fator de configuração total considerando-se a chama como superfície irradiante;

$\phi_{z_1}$  = fator de configuração a partir da chama até a face 1 do pilar;

$\phi_{z_2}$  = fator de configuração a partir da chama até a face 2 do pilar;

$\phi_{z_3}$  = fator de configuração a partir da chama até a face 3 do pilar;

$\phi_{z_4}$  = fator de configuração a partir da chama até a face 4 do pilar;

$d_1, d_2$  = largura e profundidade do pilar.

A localização e a definição das faces do pilar encontram-se ilustradas na figura 2.46.

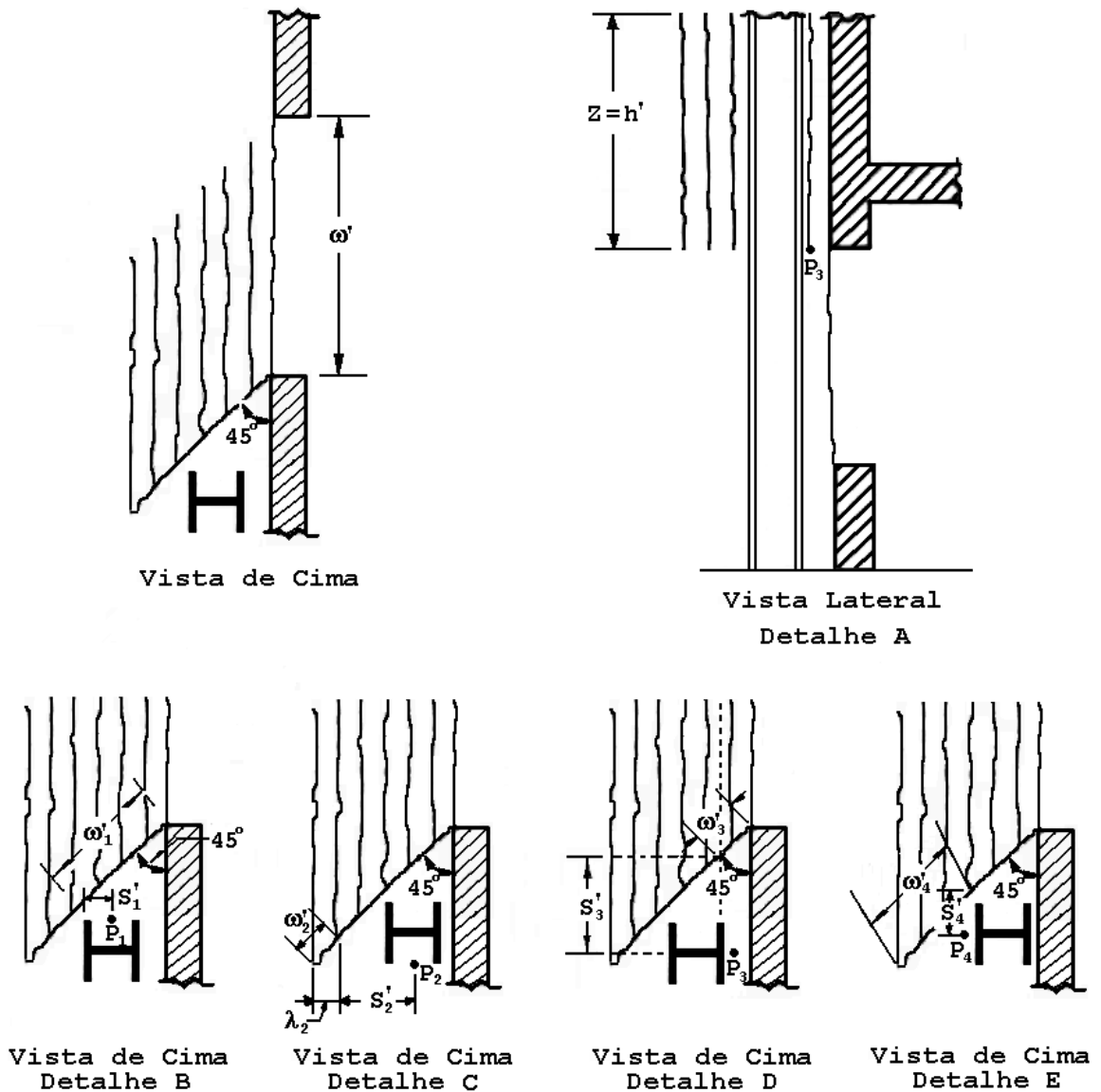


Figura 2.46: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela, com ventilação natural e a chama estimada como superfície irradiante

Para a equação 2.101, assume-se que todos os lados do pilar são visíveis à frente da chama, mas dependendo do formato da chama e da geometria do edifício, isso pode ser possível

ou não. Os cálculos indicam que se a face de um pilar não estiver exposta, então o termo  $\phi$  para esta face é igual a zero. Se o pilar estiver contra a parede, por exemplo, então o termo  $\phi_{z_3} = 0$ . Na condição de ventilação natural, toma-se o formato da chama imaginária como sendo uma chama defletida pelo vento, de acordo com o apresentado na figura 2.46.

Deve-se ressaltar que na equação geral 2.101, o fator de configuração é considerado como uma média sobre o perímetro do pilar exposto ao ar ambiente. Se, por exemplo, uma face do pilar estiver contra a parede, então o denominador da equação 2.101 torna-se  $2d_1+d_2$  e a equação geral, onde o valor de  $\phi_{z_3}$  é igual a zero, passa a ser:

$$\phi_z = \frac{(\phi_{z_1} + \phi_{z_2})d_1 + \phi_{z_4}d_2}{2d_1 + d_2} \quad (2.102)$$

Pode-se fazer o mesmo ajuste para as outras faces do pilar, as quais não estão expostas.

Para esta condição em estudo, deve-se assumir que o pilar seja orientado paralelamente ou perpendicularmente à frente do edifício. Considera-se também que não haja projeção da chama a partir de uma janela do outro lado do pilar. Para outras situações, devem-se realizar cálculos extras. Se, realmente, a face ou as faces do pilar recebem radiação de outras chamas, devem-se fazer cálculos separados para cada face e, em seguida, os valores de  $\phi$ , de cada face, devem ser todos somados e usados na equação 2.101.

Deve-se obter o valor de  $\phi_{z_1}$ , fator de configuração total para a face 1, no gráfico 2.3, considerando-se um ângulo  $\theta=45^\circ$ . Para utilização do gráfico, deve-se conhecer os valores de a e b, que são calculados através da fórmula 2.94, de acordo com os detalhes A e B da figura 2.46.

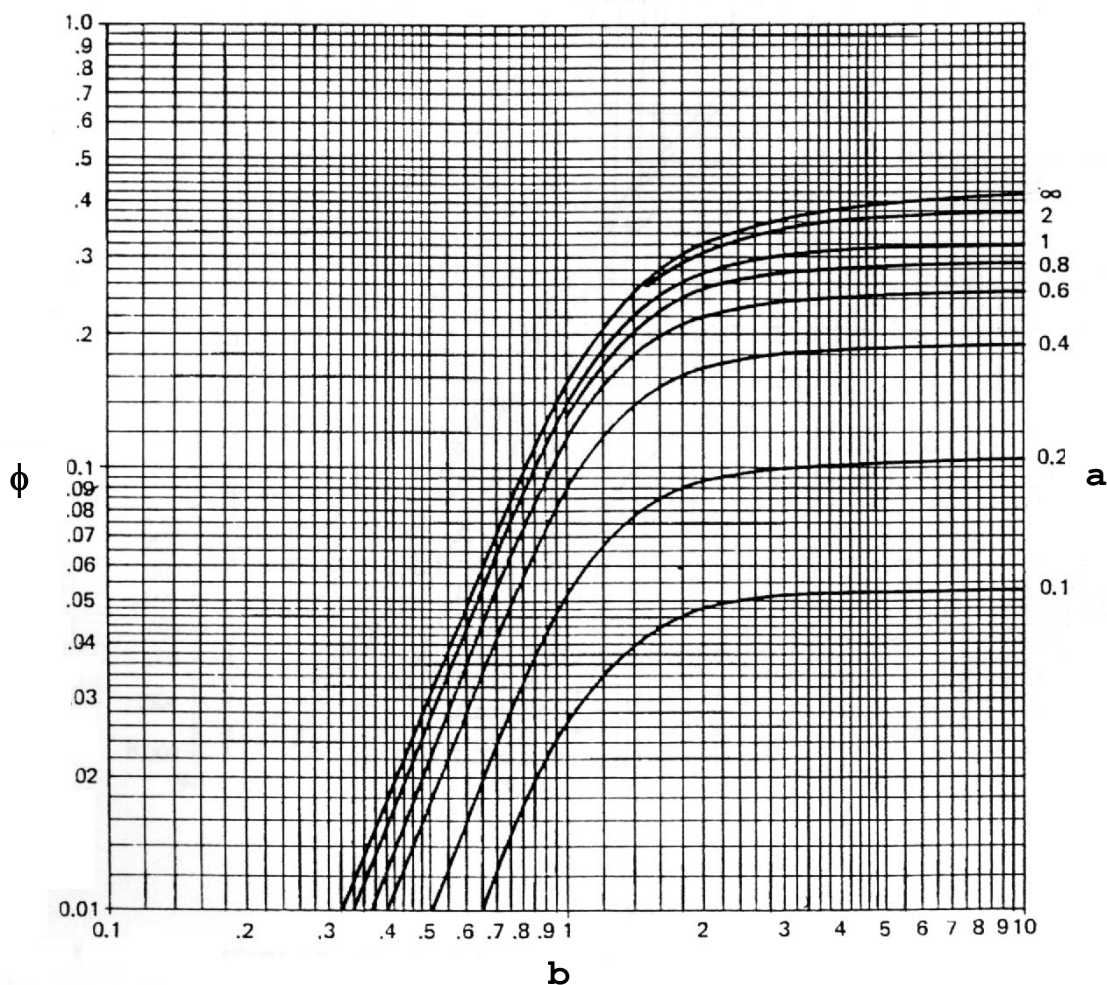


Gráfico 2.3: Fator de configuração para  $\theta = 45^\circ$

O fator de configuração total para a face 2,  $\phi_{z_2}$ , é obtido no gráfico 2.4, que considera  $\theta=135^\circ$ . Para essa face, deve-se utilizar a relação 2.95 para a obtenção dos valores de a



e b, observando-se as dimensões  $\omega'_2$  e  $S'_2$  nos detalhes A e C da figura 2.46.

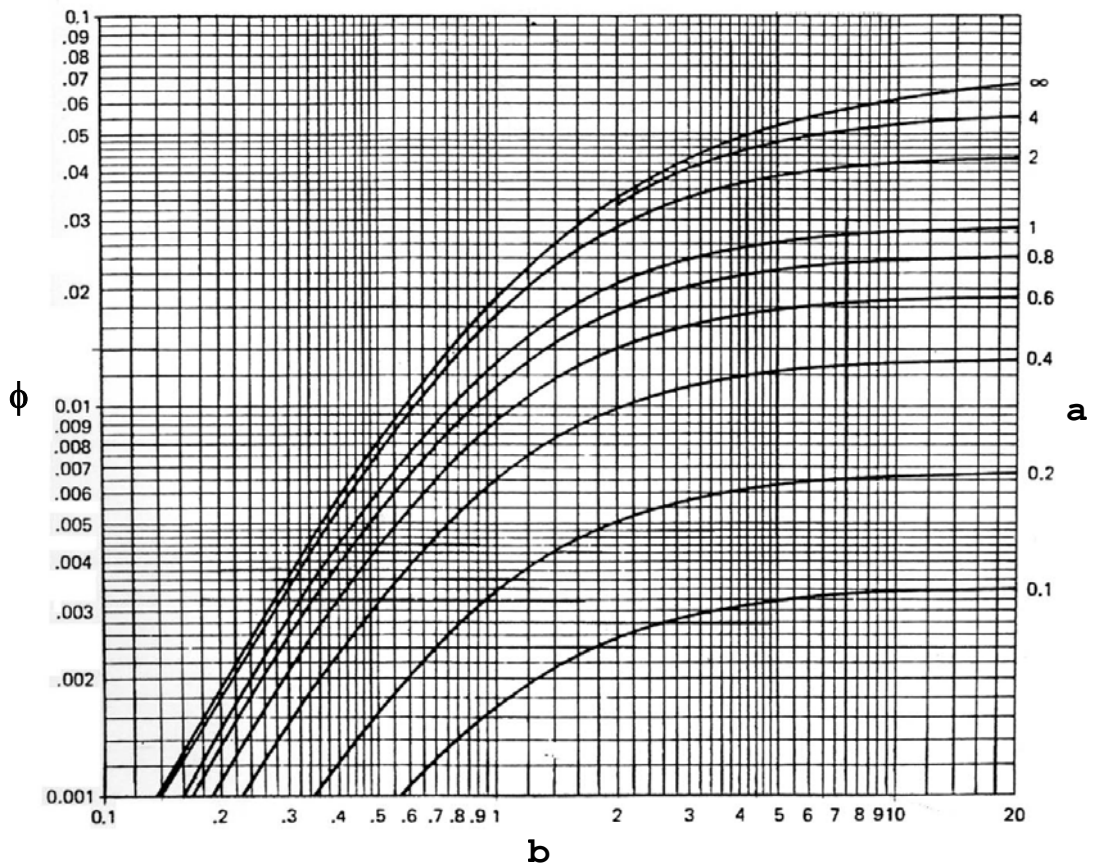


Gráfico 2.4: Fator de configuração para  $\theta = 135^\circ$

Para a face 3, o valor do fator de configuração total,  $\phi_{z_3}$ , também é obtido no gráfico 2.4. Deve-se utilizar a relação 2.103 para a obtenção dos valores de a e b, observando-se as dimensões  $\omega'_3$  e  $S'_3$  nos detalhes A e D da figura 2.46:

$$a = h' / S_3 \quad (2.103)$$

$$b = \omega_3' / S_3'$$

O valor do fator de configuração total,  $\phi_{z_4}$ , para a face 4 do pilar, é obtido através do gráfico 2.3. Utiliza-se a relação 2.104 para a obtenção dos parâmetros a e b, observando-se as dimensões  $\omega_4'$  e  $S_4'$ , como mostrado nos detalhes A e E da figura 2.46:

$$a = h' / S_4' \quad (2.104)$$

$$b = \omega_4' / S_4'$$

Deve-se notar que, para toda a seqüência apresentada anteriormente, assume-se que todas as faces do pilar são visíveis à chama. Outras condições podem ser consideradas ao usar uma simples extensão do método aqui apresentado e ao serem feitas mudanças apropriadas na equação 2.101.

#### 2.1.6.2.2.2.2 *Janela como Superfície Irradiante*

A equação geral para essa condição é a equação 2.99.

Para essa situação, assume-se que o pilar seja paralelo ou perpendicular à frente do edifício, portanto, o valor do parâmetro  $\phi_{f_4}$  é nulo, isto é, a parte traseira do pilar (em relação à frente da janela) não é vista pelo incêndio.

Além disso, admite-se que não haja radiação do incêndio, proveniente de uma janela, a qual esteja do outro lado do pilar (isto é, a radiação é emitida apenas de uma janela). Se, de fato, a face ou as faces do pilar recebem radiação proveniente de outra janela, devem-se fazer cálculos separados para cada face, e então, adicionam-se os valores de  $\phi$  para cada face, aplicando-os, em seguida, na equação 2.99.

Deve-se obter o valor de  $\phi_{f_1}$ , fator de configuração total para a face 1, no gráfico 2.1, considerando-se um ângulo  $\theta=90^\circ$ . Para utilização do gráfico, deve-se conhecer os valores de a e b, que são calculados através da fórmula 2.105, de acordo com os detalhes A, B e C da figura 2.47, a qual esboça o parâmetro  $S_1'$ :

$$a = h' / S_1' \quad (2.105)$$

$$b = \omega' / S_1'$$

Para a face 3, o valor do fator de configuração total,  $\phi_{f_3}$ , é obtido no gráfico 2.2, ao considerar um radiador paralelo. Deve-se utilizar a relação 2.106 para a obtenção dos valores de a e b, observando-se a dimensão  $S_3'$  nos detalhes A, B e D da figura 2.47:

$$a = h' / S_3' \quad (2.106)$$

$$b = \omega' / S_3'$$

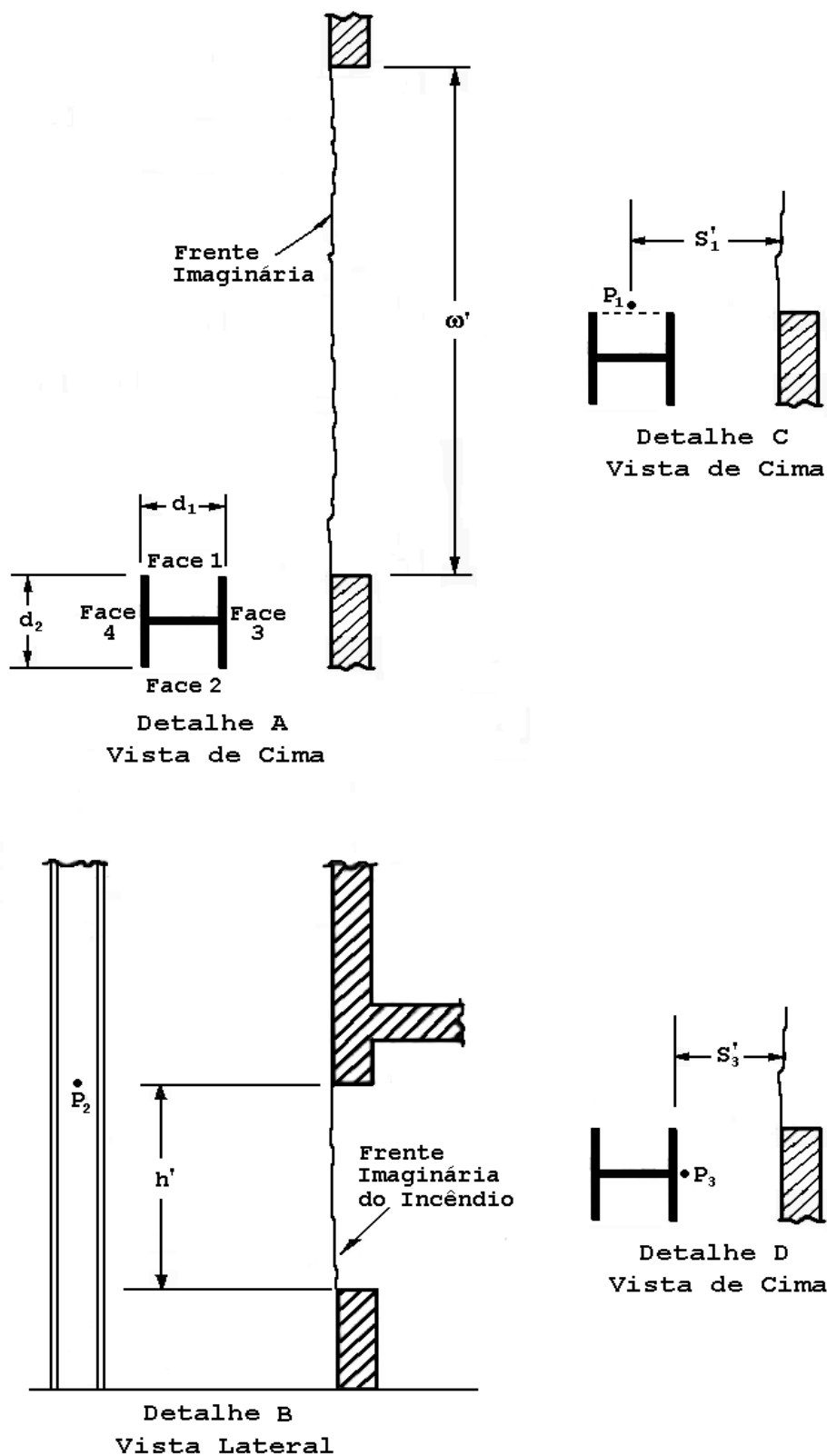


Figura 2.47: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela e a janela como superfície irradiante

O passo seguinte é calcular o fator de configuração total para o caso em estudo a partir da equação 2.99. Mas, se a face 3 estiver contra a parede, isto implicará em  $\phi_{f_3} = 0$ . Logo, apenas três faces estarão expostas ao ar ambiente. Para essa nova condição, deve-se obter o valor de  $\phi_f$  através da equação 2.107.

$$\phi_f = \frac{(\phi_{f_1} + \phi_{f_2})d_1}{2d_1 + d_2} \quad (2.107)$$

#### 2.1.6.2.2.3 *Pilar ao lado da Janela sob Condições de Ventilação Forçada*

##### 2.1.6.2.2.3.1 *Chama como Superfície Irradiante*

A equação utilizada para essa situação é a mesma usada para o pilar ao lado da janela, com ventilação natural, considerando-se também a chama como superfície irradiante, ou seja, a equação 2.101. Consideram-se aqui também as mesmas suposições feitas para o item 2.1.6.2.2.2.1.

Nesta condição, agora em estudo, também a equação 2.101 se transforma na relação 2.102, caso uma das faces do pilar esteja posicionada contra a parede. No caso em questão, foi exemplificado como sendo  $\phi_{z_3} = 0$ . Entretanto, pode-se fazer um ajuste análogo para as outras faces não expostas do pilar.

A dimensão  $S'_1$ , entre cada face do pilar e o lado da chama, deve ser baseada no acréscimo de largura da chama devido à ventilação forçada.

O componente do fator de configuração,  $\phi_{z_{1D}}$ , para a face 1 do pilar, dado pelo lado direito da frente da chama, deve ser obtido no gráfico 2.2, o qual considera uma superfície irradiante paralela. Os parâmetros a e b, necessários para a utilização deste gráfico, devem ser calculados através da fórmula 2.108, observando-se as dimensões  $\omega'_{1D}$  e  $S'_1$ , esboçadas no detalhe C da figura 2.48:

$$a = h' / S'_1 \quad (2.108)$$

$$b = \omega'_{1D} / S'_1$$

Para o componente do fator de configuração,  $\phi_{z_{1E}}$ , da face 1 do pilar, dado pelo lado esquerdo da frente da chama, segue-se a mesma orientação anterior porém, deve-se aplicar a fórmula 2.109 para o uso do gráfico 2.2:

$$a = h' / S'_1 \quad (2.109)$$

$$b = \omega'_{1E} / S'_1$$

onde as dimensões  $\omega'_{1E}$  e  $S'_1$  também se encontram ilustradas no detalhe C da figura 2.48.

A partir de agora, pode-se, então, calcular o fator de configuração para a face 1, conforme a equação abaixo:

$$\phi_{z_1} = \phi_{z_{1D}} + \phi_{z_{1E}} \quad (2.110)$$

Para a face 3, o valor do fator de configuração total,  $\phi_{z_3}$ , é obtido no gráfico 2.1, que considera um ângulo  $\theta=90^\circ$ . Deve-se utilizar a relação 2.103 para a obtenção dos valores de a e b, observando-se as dimensões  $\omega'_3$  e  $S'_3$  no detalhe D da figura 2.48.

O valor do fator de configuração total,  $\phi_{z_4}$ , para a face 4 do pilar, é obtido também através do gráfico 2.1. Utiliza-se a relação 2.104 para a obtenção dos parâmetros a e b, observando-se as dimensões  $\omega'_4$  e  $S'_4$ , como mostrado no detalhe E da figura 2.48.

Após terminadas todas essas operações, a equação 2.101 encontra-se pronta para ser utilizada. Deve-se notar que, para a consideração demonstrada anteriormente, assume-se que a face 2 não é vista pela chama, ou seja,  $\phi_{z_2} = 0$ .

#### 2.1.6.2.2.3.2 *Janela como Superfície Irradiante*

Para o cálculo do fator de configuração, com o pilar ao lado da janela, sob condições de ventilação forçada e a janela como superfície irradiante, considera-se todo o procedimento adotado para a situação com ventilação

natural, do item 2.1.6.2.2.2.2, inclusive a equação geral 2.99 e a figura 2.48.

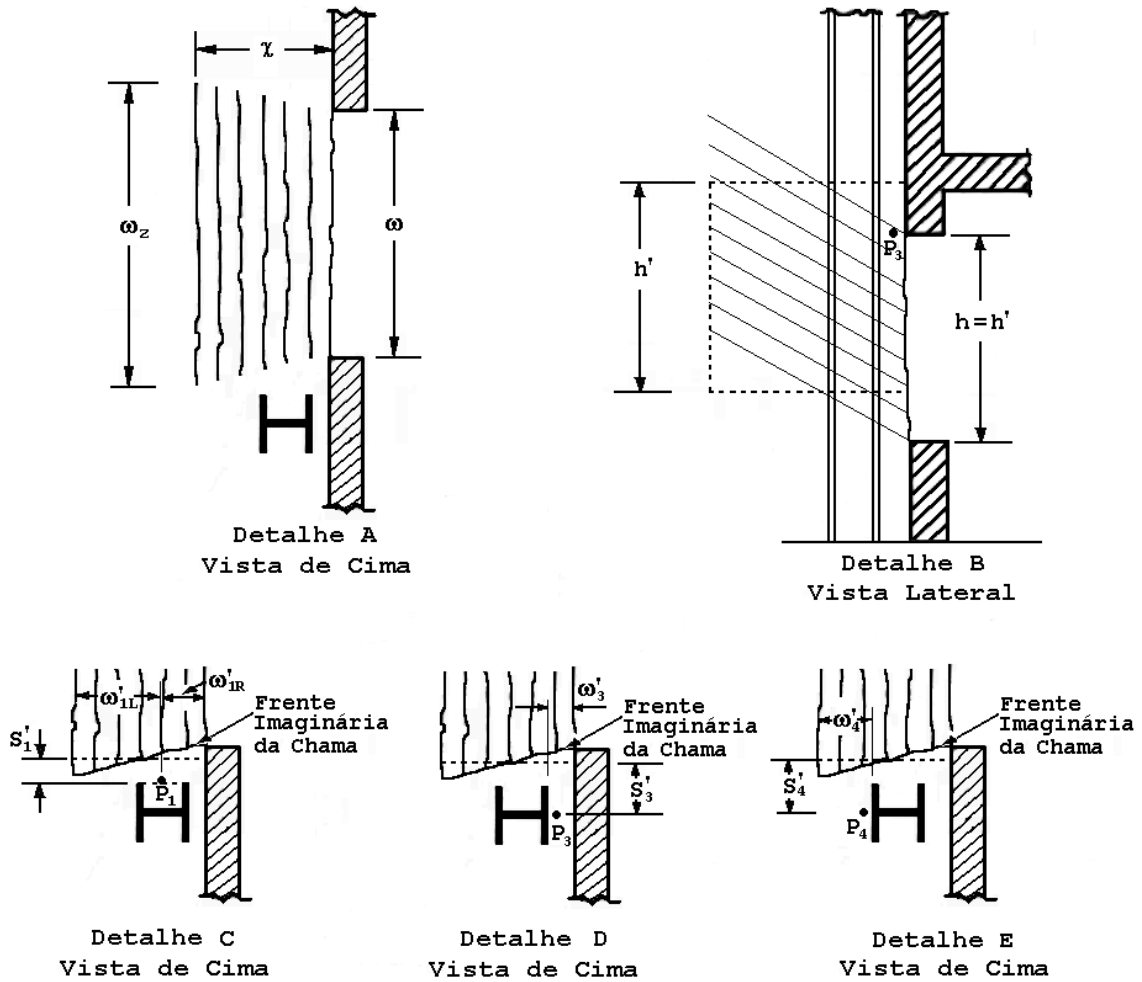


Figura 2.48: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela, com ventilação forçada e a chama como superfície irradiante



### 2.1.7 ANTEPAROS

Os anteparos têm por objetivo a proteção das peças externas de aço contra a transferência de calor por radiação, podendo eles estar presentes em um, dois ou três lados da peça.

Os anteparos podem aparecer diretamente vinculados ao lado da peça de aço, o qual pretende-se proteger ou então podem ser suficientemente grandes para encobrir completamente o lado do previsto fluxo de calor por radiação.

Segundo o Eurocode 3 Part 1-2 (2), é necessário observar que os anteparos devem ser feitos de materiais não combustíveis e devem ter uma resistência ao incêndio de pelo menos 30 minutos, conforme a ISO 834 (7).

Para se determinar a temperatura nas estruturas externas, protegidas por anteparos, assume-se que não haja transferência de calor por radiação para os lados protegidos com os anteparos. Além disso, deve-se levar em conta o fluxo de calor por radiação proveniente do compartimento incendiado, o fluxo de calor por radiação e por convecção das chamas provenientes das aberturas, a perda de calor por radiação e por convecção da estrutura para o meio ambiente e também os tamanhos e a localização das peças estruturais.

## 2.1.8 VIGAS DE BORDO

### 2.1.8.1 Vigas de Bordo com Mesas Protegidas

Devido a essas vigas estarem muito próximas das chamas que se emergem das janelas, torna-se normalmente necessário isolar e proteger suas mesas, conforme mostrado na tabela 2.4. De acordo com o comportamento da chama, deve haver uma altura mínima da viga para que haja área da alma suficiente a fim de resfriar o ar na vizinhança. Tal altura mínima da alma é simbolizada por B e pode ser tirada da tabela 2.4, de acordo com a altura da janela.

A figura 2.49 ilustra uma viga de bordo com as suas mesas protegidas.

Altura da janela (h) m	Altura mínima da alma (B) m
0,9	1,8
1,2	0,9
1,5	0,6
1,8	0,3
acima de 1,8	0,3

Tabela 2.4: Viga de bordo com mesas protegidas e ventilação natural.

As tabelas 2.4 e 2.5 restringem a temperatura do aço a valores inferiores a 538°C.

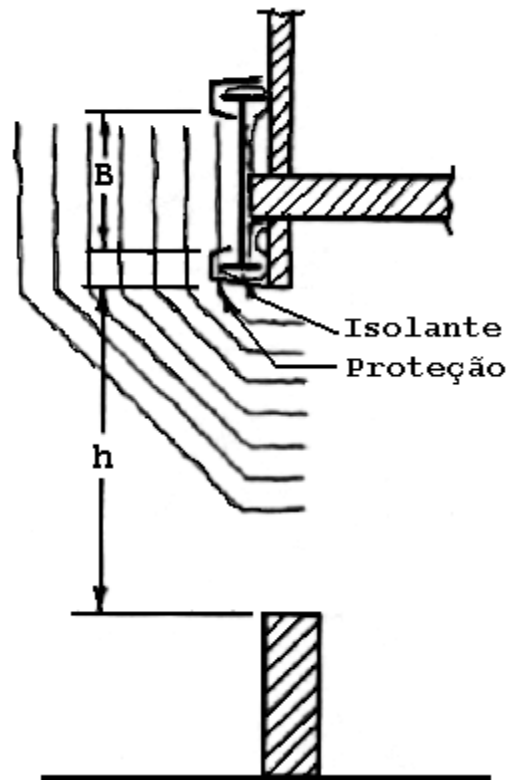


Figura 2.49: Viga de bordo com mesas protegidas e ventilação natural.

#### 2.1.8.2 Vigas de Bordo com Anteparo

Quando há janelas em paredes opostas, as chamas emergentes em condições de ventilação forçada devem ser defletidas por uma chapa ou um toldo, segundo a figura 2.50. A projeção horizontal,  $h_a$ , do anteparo está relacionada à altura da alma,  $B$ , e à altura da janela,  $h$ , conforme mostra a tabela 2.5.

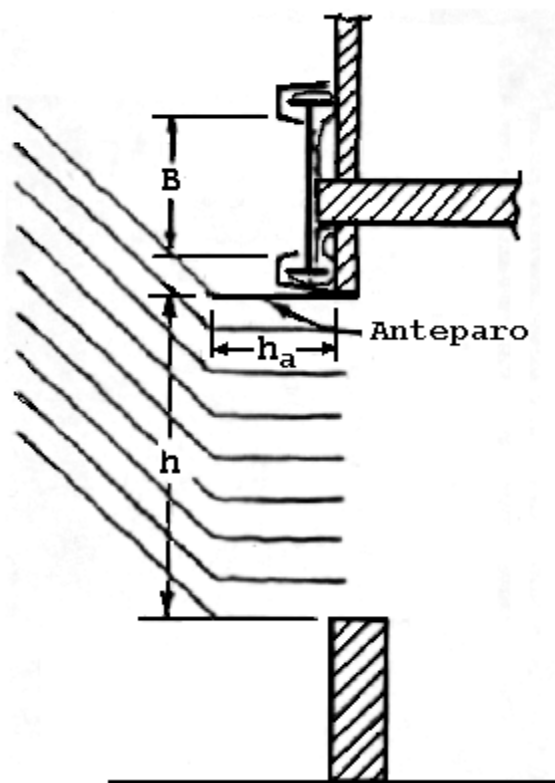


Figura 2.50: Viga de bordo com anteparo e condições de ventilação forçada

Altura da janela (h) m	Largura mínima do anteparo altura da alma ( $h_a/B$ ) adimensional
0,9	0,30
1,2	0,27
1,5	0,26
1,8	0,24
2,7	0,23
3,7	0,21
4,6	0,20

Tabela 2.5: Projeção horizontal do anteparo para viga de bordo com ventilação forçada

## 2.2 TEMPERATURAS MEDIDAS NAS PEÇAS EXTERNAS

### 2.2.1 PILARES NÃO ENVOLVIDOS EM CHAMAS

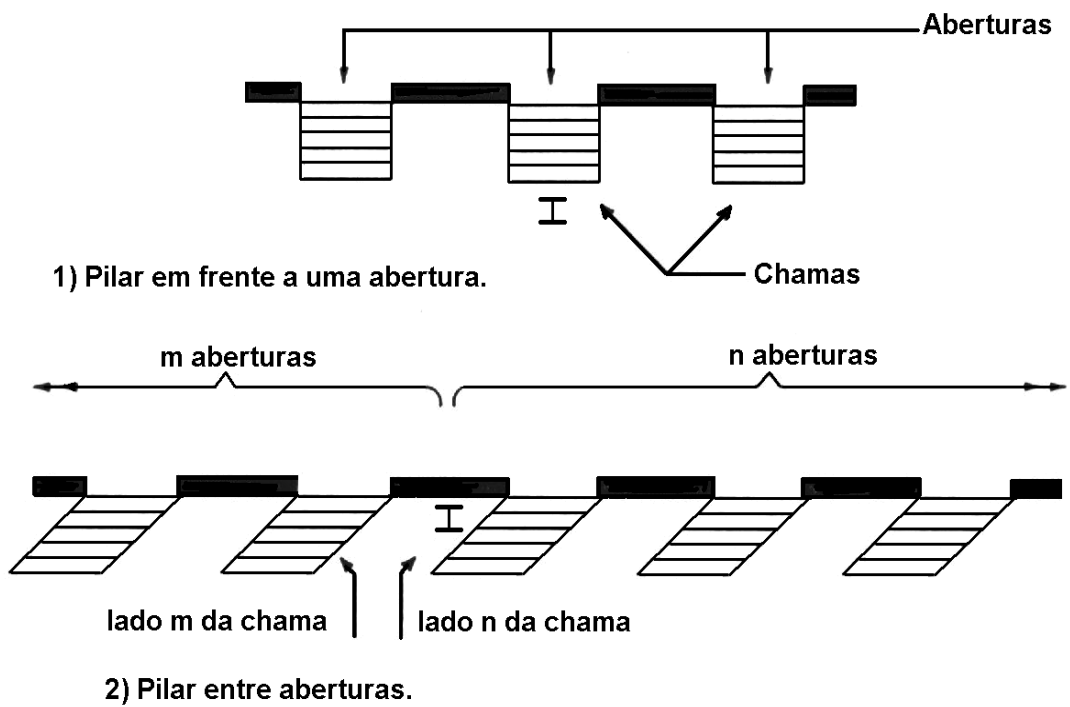
#### 2.2.1.1 Transferência de Calor por Radiação

Primeiramente, para o estudo deste item, deve-se distinguir um pilar situado em frente a uma abertura e um pilar posicionado entre as aberturas, conforme ilustrado na figura 2.51.

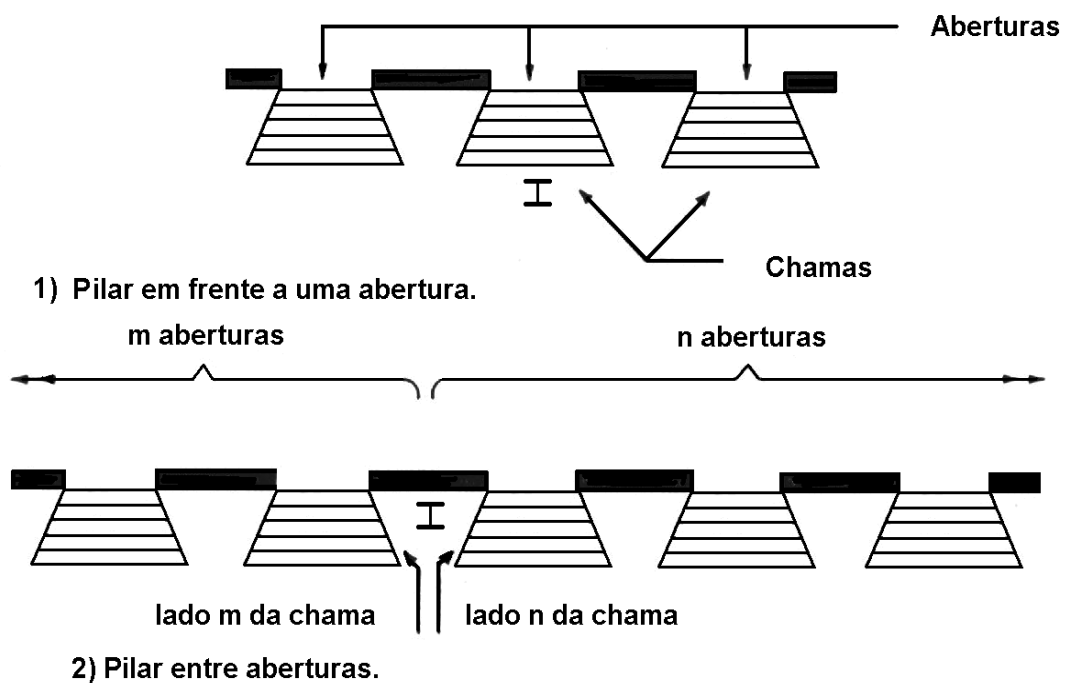
Se o pilar estiver em frente a uma abertura, de acordo com a figura 2.52, o fluxo de calor por radiação  $I_z$  proveniente da chama, deve ser determinado pela equação seguinte:

$$I_z = \phi_z \varepsilon_z \sigma (T_z + 273,15)^4 \quad (2.111)$$

sendo que todos estes parâmetros já foram anteriormente devidamente explicados.

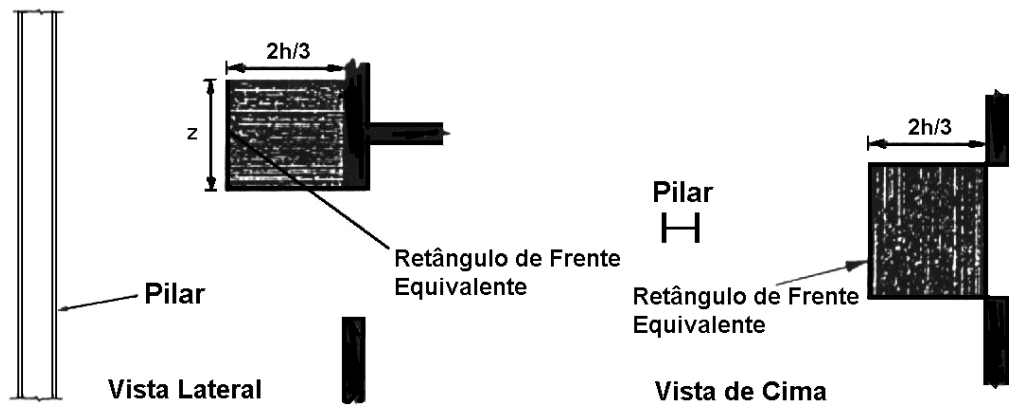


a) "Sem ventilação forçada".

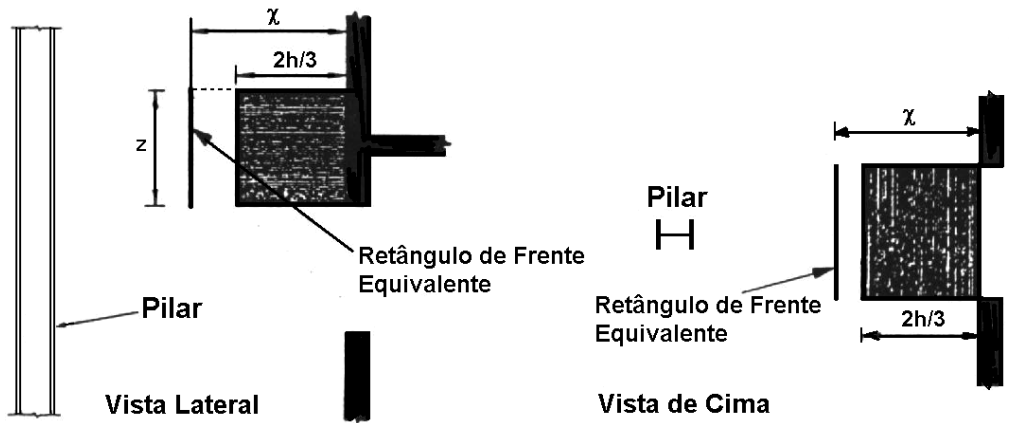


b) "Ventilação forçada".

Figura 2.51: Posições dos pilares

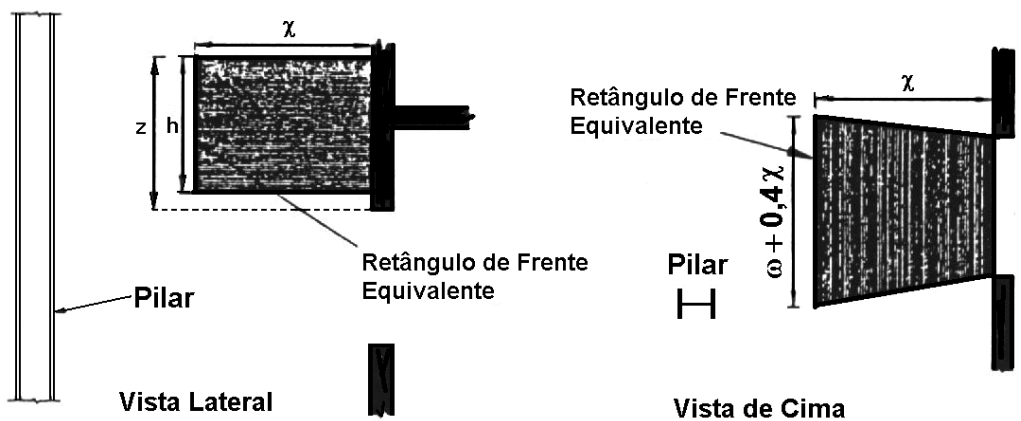


1) Parede Superior e  $h < 1,25\omega$



2) Parede Superior e  $h > 1,25\omega$  ou nenhuma parede superior

a) "Sem ventilação forçada".



b) "Ventilação forçada".

Figura 2.52: Pilar em frente a uma abertura

Se o pilar estiver situado entre aberturas, conforme ilustrado na figura 2.53, o fluxo total de calor por radiação  $I_z$  proveniente das chamas, em cada lado, deve ser determinado pela equação 2.112, como a seguir:

$$I_z = (\phi_{z,m}\epsilon_{z,m} + \phi_{z,n}\epsilon_{z,n})\sigma(T_z + 273,15)^4 \quad (2.112)$$

onde:

$\phi_{z,m}$  = fator de configuração total do pilar para aquecimento a partir do lado m das chamas;

$\phi_{z,n}$  = fator de configuração total do pilar para aquecimento a partir do lado n das chamas;

$\epsilon_{z,m}$  = emissividade total das chamas no lado m;

$\epsilon_{z,n}$  = emissividade total das chamas no lado n.

#### 2.2.1.2 Emissividade das Chamas

Se o pilar estiver em frente a uma abertura, de acordo com o Eurocode 3 Part 1-2 (2), deve-se determinar a emissividade da chama,  $\epsilon_z$ , a partir das expressões para o cálculo de  $\epsilon$ , apresentadas nos itens anteriores, usando a espessura das chamas,  $\lambda$ , no nível do topo das aberturas. Desde que não haja toldo ou sacada acima da abertura,  $\lambda$  pode ser obtido como a seguir:

- para a condição de ventilação natural, conforme já apresentado no item 2.1.2.4.3.10, utiliza-se a relação  $\lambda = 2h / 3$ ;



- para a condição de ventilação forçada:

$$\lambda = \chi \quad \text{mas} \quad \lambda \leq h\chi / z \quad (2.113)$$

onde, conforme os tópicos anteriores:

$h$  = altura da janela;

$\chi$  = distância horizontal do topo da chama até a janela;

$z$  = altura da chama acima da janela.

Se o pilar estiver situado entre duas aberturas, as emissividades totais  $\epsilon_{z,m}$  e  $\epsilon_{z,n}$  das chamas nos lados  $m$  e  $n$  devem ser determinadas a partir da expressão  $\epsilon_z = 1 - e^{-0,3\lambda}$ , usando o valor da espessura total das chamas,  $\lambda$ , como a seguir.:

- para a face  $m$ : 
$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_j \quad (2.114)$$

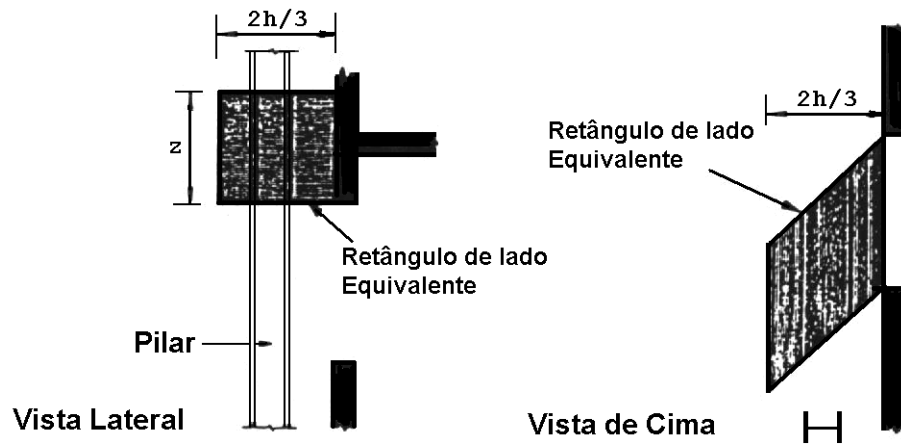
- para a face  $n$ : 
$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_j \quad (2.115)$$

onde:

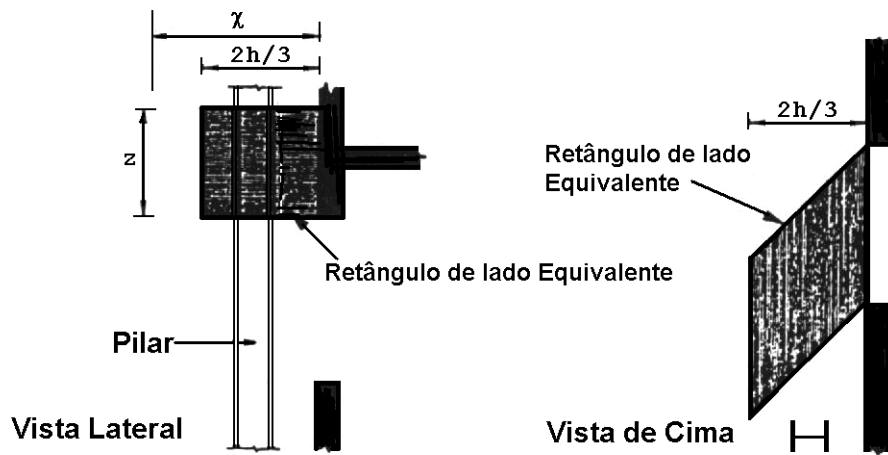
$m$  = número de aberturas no lado  $m$ ;

$n$  = número de aberturas no lado  $n$ ;

$\lambda_j$  = espessura da chama na abertura  $j$ .

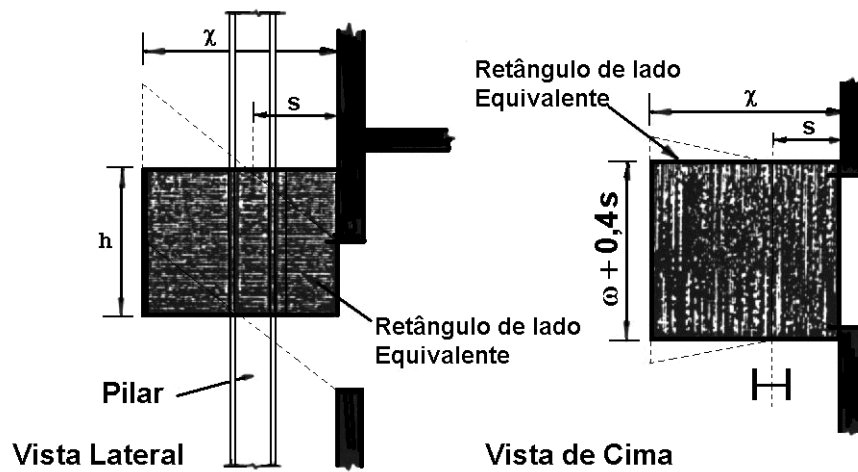


1) Parede superior e  $h < 1,25\omega$



2) Parede superior e  $h > 1,25\omega$  ou sem parede superior.

a) "Sem ventilação forçada".



b) "Ventilação forçada".

Figura 2.53: Pilar entre aberturas

Sob condições de ventilação natural, a espessura da chama,  $\lambda_j$ , deve ser obtida pela seguinte fórmula:

$$\lambda_j = \omega_j \quad (2.116)$$

Porém, para situações de ventilação forçada, a espessura da chama passa a ser calculada pela fórmula 2.117:

$$\lambda_j = \omega_j + 0,4S \quad (2.117)$$

onde:

$\omega_j$  = largura da abertura;

S = distância horizontal do eixo do pilar à parede do compartimento incendiado, conforme ilustrado nas figuras 2.27 e 2.28.

#### 2.2.1.3 Temperatura da Chama

Para os pilares não envolvidos em chamas, pode-se observar, na figura 2.54, uma comparação entre as temperaturas medidas e as calculadas em incêndios com ventilação natural. Já a figura 2.55 ilustra o mesmo caso, porém para situações com ventilação forçada. Law (3) ressalta que as figuras estão adequadas, embora as temperaturas calculadas, durante os ensaios realizados, tendam a ser ligeiramente mais baixas que as medidas, para os ensaios com ventilação forçada. Deve-se dizer que as temperaturas críticas, normalmente adotadas nos ensaios padrões de resistência ao incêndio para as categorias de aço estrutural, são de aproximadamente 518 °C para pilares.

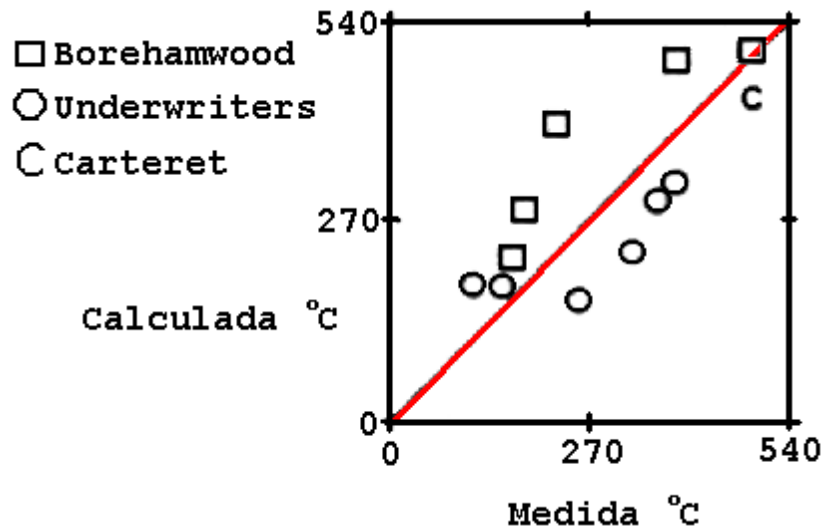


Figura 2.54: Temperaturas medidas e calculadas dos pilares não envolvidos em chamas, para os testes em escala natural com ventilação natural

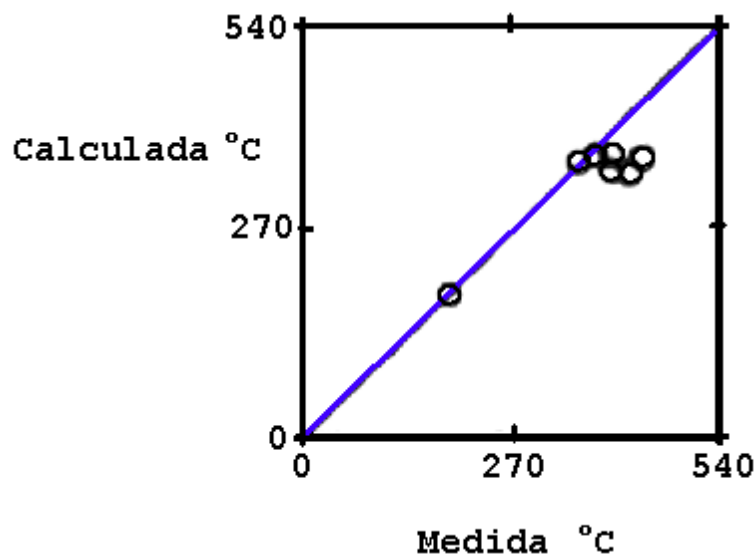


Figura 2.55: Temperaturas medidas e calculadas dos pilares não envolvidos em chamas, para os testes em escala natural com ventilação forçada, considerando os dados obtidos dos Laboratórios Underwriters

Deve-se tomar a temperatura da chama,  $T_z$ , como sendo a temperatura do eixo da chama, obtida da expressão 2.38 para a condição de ventilação natural ou da expressão 2.60 quando a situação for de ventilação forçada. O eixo da chama deve estar a uma distância  $\ell$  da abertura, devendo  $T_z$  ser medido ao longo do eixo da chama.

O Eurocode 3 Part 1-2 (2) determina que, sob condições de ventilação natural, o valor de  $\ell$  deve ser determinado por:

$$\ell = h / 2 \quad (2.118)$$

Entretanto, para os casos de ventilação forçada, há duas situações distintas:

- se o pilar estiver em frente a uma abertura:

$$\ell = 0 \quad (2.119)$$

- caso o pilar esteja situado entre aberturas, o parâmetro  $\ell$  é definido como a distância do eixo da chama até um ponto a uma distância horizontal  $s$  da parede do compartimento incendiado. Logo, desde que não haja toldo ou sacada acima da abertura, pode-se calcular o valor de  $\ell$  através de equação seguinte:

$$\ell = SX / \chi \quad (2.120)$$

onde

$X$  = comprimento da chama ao longo do eixo, conforme já apresentado.

#### 2.2.1.4 Absortividade da Chama

Define-se absortividade como sendo a capacidade de absorção da radiação incidente sobre um determinado corpo.

O Eurocode 3 Part 1-2 (2) determina que, para condições de ventilação natural, deve-se considerar a absortividade da chama,  $a_z$ , como zero.

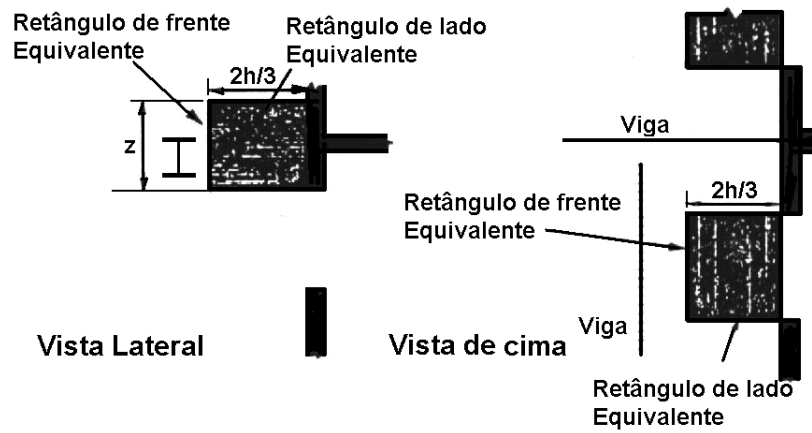
Porém, sob condições de ventilação forçada, deve-se considerar a absortividade da chama,  $a_z$ , igual à emissividade da chama,  $\varepsilon_z$ , conforme o item 2.2.1.3.

### 2.2.2 VIGAS NÃO ENVOLVIDAS EM CHAMAS

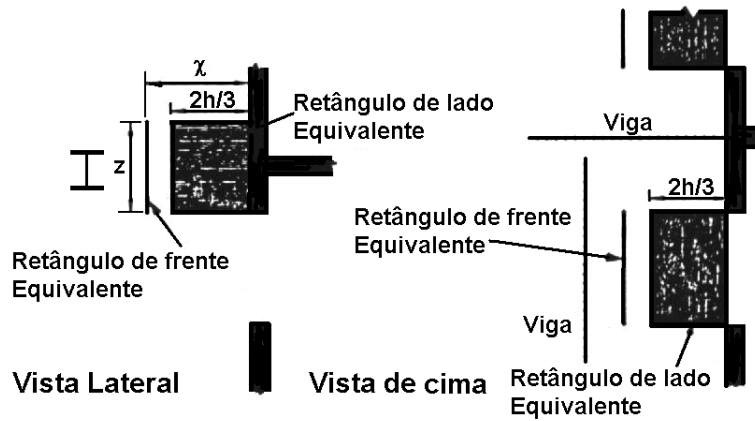
#### 2.2.2.1 Transferência de Calor por Radiação

Para o estudo da viga não envolvida em chamas, assume-se que o nível da parte inferior da viga não esteja abaixo do nível do topo das aberturas no compartimento incendiado.

Neste presente trabalho, distingue-se viga paralela de viga perpendicular à parede externa do compartimento incendiado, conforme mostra a figura 2.56.

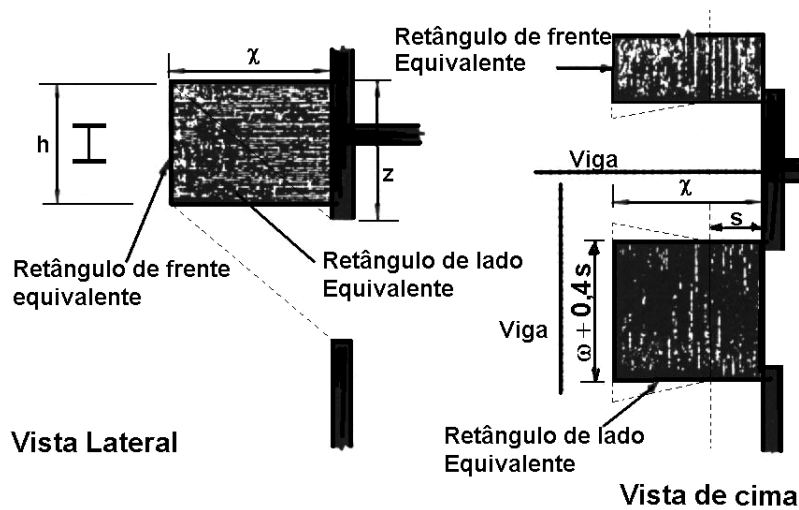


1) Parede superior e  $h < 1,25\omega$



2) Parede superior e  $h > 1,25\omega$  ou sem parede superior.

a) "Sem ventilação forçada".



b) "Ventilação forçada".

Figura 2.56: Viga não envolvida em chamas

O Eurocode 3 Part 1-2 (2) especifica que, se a viga estiver paralela à parede externa do compartimento, determina-se a temperatura média,  $T_m$ , da peça em um determinado ponto, no comprimento da viga, o qual deve se localizar diretamente acima do centro da abertura. Para esta situação, deve-se calcular o fluxo de calor por radiação da chama,  $I_z$ , através da equação 2.111. Nesse caso,  $\phi_z$  é o fator de configuração total considerando a chama diretamente em frente à viga.

Entretanto, se a viga estiver perpendicular à parede externa do compartimento incendiado, determinam-se as temperaturas na viga em uma série de pontos, a cada 100mm, ao longo do seu comprimento. Toma-se, então a temperatura média,  $T_m$ , da peça como sendo o máximo desses valores. Nesse caso, calcula-se o fluxo de calor por radiação,  $I_z$ , proveniente das chamas, através da utilização da equação 2.112. Os parâmetros  $\phi_{z,m}$  e  $\phi_{z,n}$  são o fator de configuração total da viga para o calor proveniente das chamas nos lados m e n respectivamente.

#### 2.2.2.2 Emissividade da Chama

Por determinação do Eurocode 3 Part 1-2 (2), se a viga estiver paralela à parede externa do compartimento incendiado, acima de uma abertura, determina-se a emissividade da chama,  $\epsilon_z$ , a partir da expressão  $\epsilon_z = 1 - e^{-0,3\lambda}$ . Deve-se considerar a espessura das chamas,  $\lambda$ , no nível do topo das aberturas. Não havendo toldo ou



sacada acima da abertura,  $\lambda$  pode ser obtido como para a situação de pilares não envolvidos em chamas.

Para uma viga perpendicular à parede externa do compartimento incendiado, situada entre duas aberturas, as emissividades totais,  $\varepsilon_{z,m}$  e  $\varepsilon_{z,n}$ , das chamas nos lados m e n também devem ser determinadas a partir da expressão  $\varepsilon_z = 1 - e^{-0,3\lambda}$ , usando um valor para a espessura da chama,  $\lambda$ , que é calculado como para a situação de pilares não envolvidos em chamas, através das fórmulas 2.114 e 2.115. Obtém-se a espessura da chama,  $\lambda_j$ , utilizando-se as relações 2.116 e 2.117. Para essa situação, o termo s é a distância horizontal da parede do compartimento incendiado até o ponto da viga em consideração, conforme ilustrado na figura 2.56.

#### 2.2.2.3 Temperatura da Chama

Segundo Law (3), para uma viga de separação dos andares não envolvida em chamas, em incêndios sob condições de ventilação forçada, a figura 2.57 mostra uma comparação dos ensaios feitos pelos Laboratórios Underwriters, em dois dos quais havia um toldo, o qual protegia a mesa inferior. Tanto os resultados para viga protegida, quanto para viga sem proteção, foram considerados adequados por Law (3).

As temperaturas críticas, geralmente adotadas nos ensaios padrões de resistência ao incêndio para categorias de aço estrutural, são de aproximadamente 570°C.

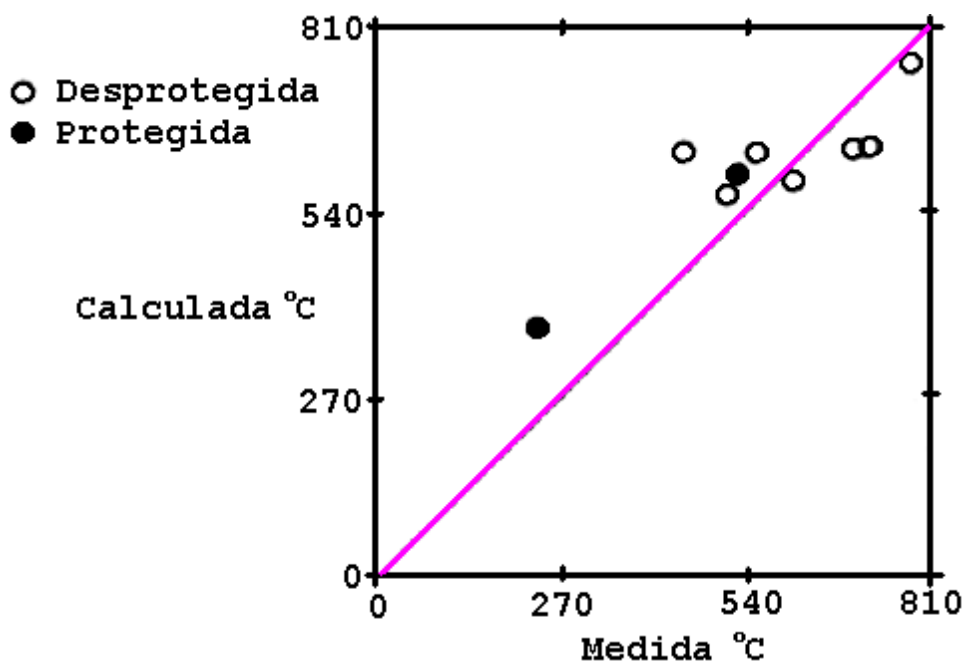


Figura 2.57: Temperaturas medidas e calculadas de uma viga de separação dos andares, considerando ventilação forçada, tendo em vista os dados dos Laboratórios Underwriters

Deve-se tomar a temperatura da chama,  $T_z$ , como sendo a temperatura do eixo da chama, obtida da expressão 2.38 para o caso de ventilação natural ou da expressão 2.60 sob condições de ventilação forçada. O eixo da chama deve estar a uma distância  $\ell$  da abertura, devendo  $T_z$  ser medido ao longo do eixo da chama.

Sob condições de ventilação natural, o valor de  $\ell$  deve ser determinado pela fórmula 2.118.

Entretanto, para os casos de ventilação forçada, pode-se ter duas situações distintas, conforme a seguir:

- ao considerar uma viga paralela à parede externa do compartimento incendiado, acima de uma abertura, usa-se a equação 2.119;
- tendo-se uma viga perpendicular à parede externa do compartimento incendiado, entre aberturas, considera-se  $l$  a distância do eixo da chama até um ponto a uma distância horizontal das parede do compartimento incendiado. Desde que não haja toldo ou sacada acima da abertura, obtém-se o valor de  $l$  a partir da equação 2.120.

#### 2.2.2.4 Absortividade da Chama

O Eurocode 3 Part 1-2 (2) especifica que, sob condições de ventilação forçada, deve-se considerar a absortividade da chama,  $a_z$ , igual a sua emissividade,  $\epsilon_z$ , de acordo com o item 2.2.1.3.

### 2.2.3 PILARES ENVOLVIDOS EM CHAMAS

#### 2.2.3.1 Transferência de Calor por Radiação

Para os pilares envolvidos em chamas, o fluxo de calor por radiação proveniente das chamas,  $I_z$ , deve ser determinado pela equação 2.121:

$$I_z = \frac{(I_{z,1} + I_{z,2})d_1 + (I_{z,3} + I_{z,4})d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (2.121)$$

com:

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma (T_z + 273,15)^4;$$

$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_z + 273,15)^4;$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma (T_o + 273,15)^4;$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma (T_z + 273,15)^4.$$

onde:

$I_{z,j}$  = fluxo de calor por radiação da chama na face  $j$  do pilar;

$\varepsilon_{z,j}$  = emissividade das chamas em relação à face  $j$  do pilar;

$j$  = indicador da face do pilar (1), (2), (3) ou (4);

$C_j$  = coeficiente de proteção da face  $j$  da barra;

$T_z$  = temperatura da chama,  $[T_z] = ^\circ\text{C}$ ;

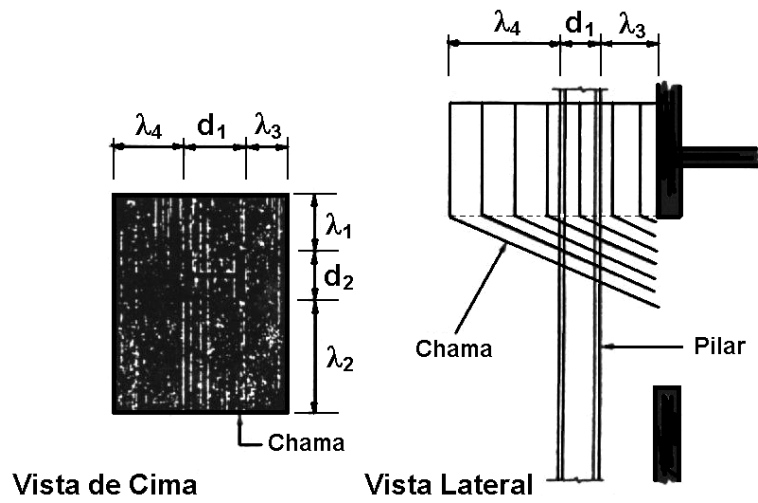
$T_o$  = temperatura da chama na abertura, obtida da equação 2.31 para a situação de ventilação natural ou da equação 2.56 sob condições de ventilação forçada,  $[T_o] = ^\circ\text{C}$ .

### 2.2.3.2 Emissividade da Chama

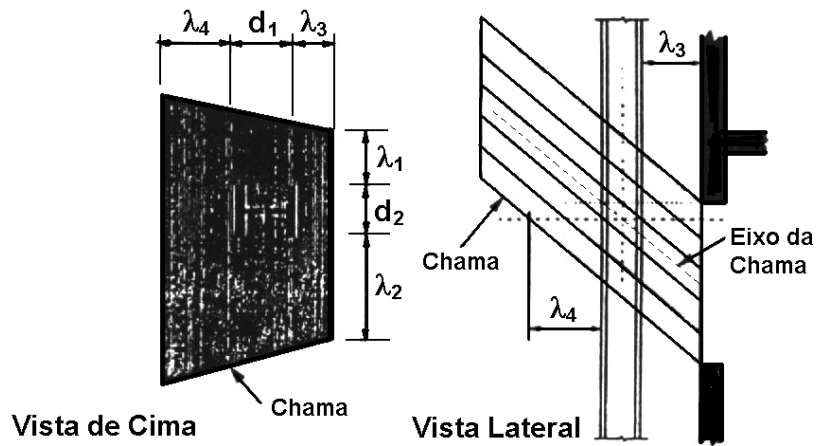
Determina-se a emissividade das chamas,  $\epsilon_{z,j}$ , para cada uma das faces 1, 2, 3 e 4 do pilar, a partir da expressão  $\epsilon_z = 1 - e^{-0,3\lambda}$ , a qual utiliza a espessura  $\lambda$  da chama igual à dimensão  $\lambda_j$ , correspondente à face  $j$  do pilar, de acordo com a figura 2.58.

Para ventilação natural, devem-se usar os valores de  $\lambda_j$  no nível do topo da abertura, como na figura 2.58(a).

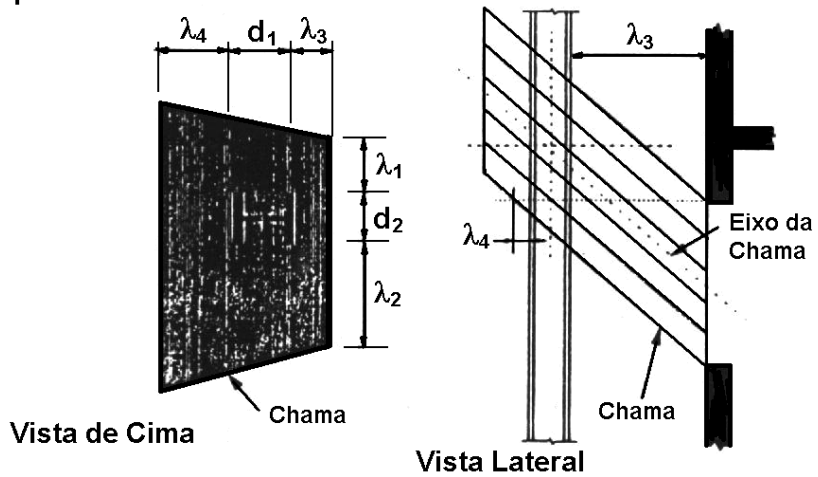
Sob condições de ventilação forçada, se o nível da interseção do eixo da chama com a linha de centro do pilar estiver abaixo do nível do topo da abertura, utilizam-se os valores de  $\lambda_j$  no nível do topo da interseção, conforme mostrado na figura 2.58(b)(1). Do contrário, os valores de  $\lambda_j$  devem ser usados no nível do topo da abertura, como ilustrado na figura 2.58(b)(2), exceto se  $\lambda_4 < 0$  nesse nível pois, devem-se usar os valores no nível onde  $\lambda_4 = 0$ .



a) "Sem Ventilação Forçada



1) O eixo da chama intercepta o eixo do pilar abaixo do topo da abertura



2) O eixo da chama intercepta o eixo do pilar acima do topo da abertura

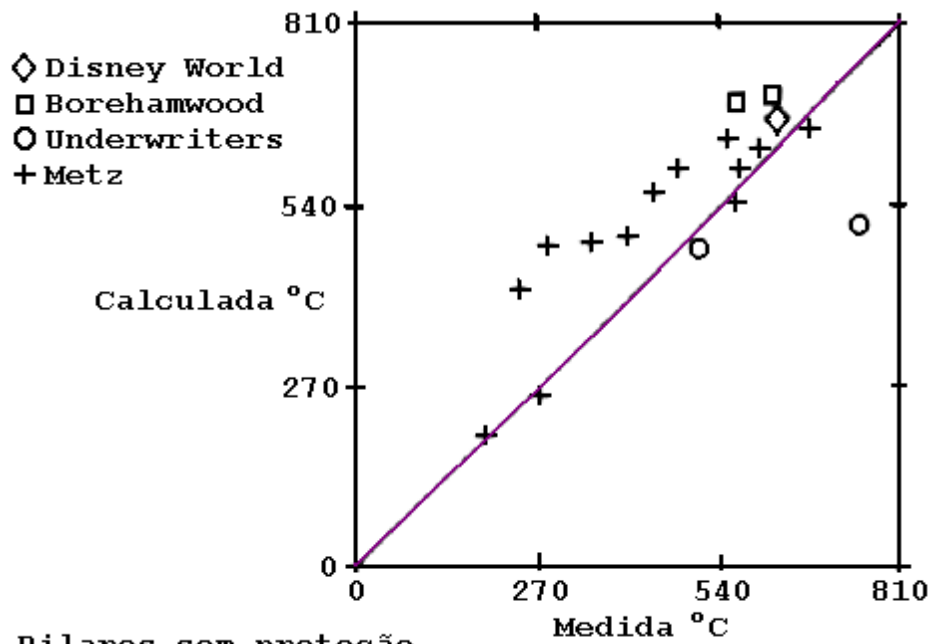
b) "Ventilação Forçada

Figura 2.58: Pilar envolvido em chamas

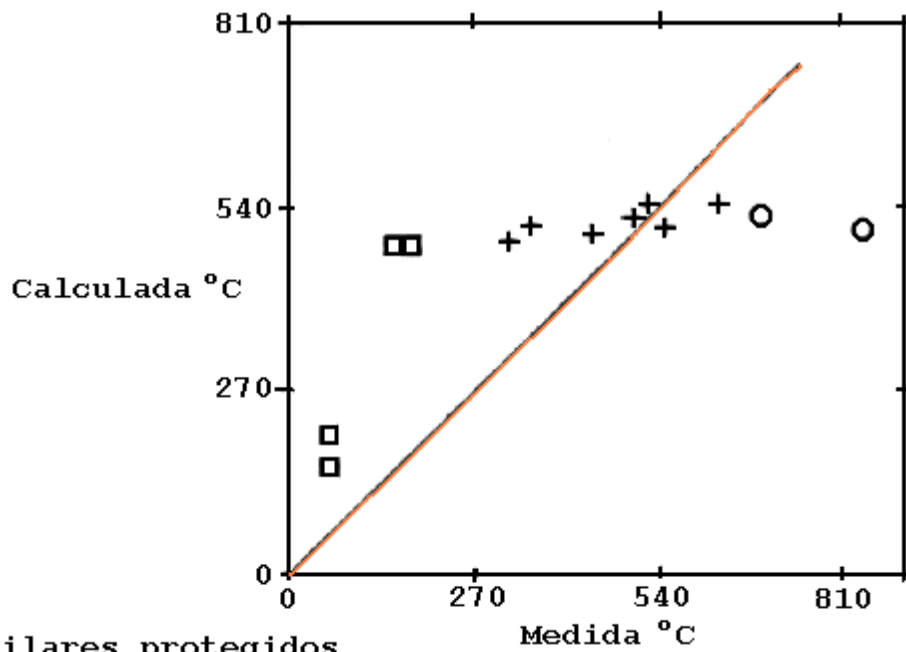
### 2.2.3.3 Temperatura da Chama

Uma comparação entre pilares envolvidos em chamas, considerando-se a condição de ventilação natural, pode ser observada na figura 2.59. Segundo Law (3), para pilares sem proteção, as temperaturas calculadas tendem a exceder os valores medidos, exceto para um dos registros dos Laboratórios Underwriters, assim como mostrado na figura 2.59. Estão também ilustrados os resultados para pilares com proteção isolante nas mesas, as quais estão com a superfície voltada para o incêndio, conforme ilustrado na figura 2.60. Para os cálculos, admitiu-se que não há transferência de calor à superfície protegida. Law (3) comenta que, para esses pilares, o método de cálculo erra a favor da segurança, exceto para os registros dos Laboratórios Underwriters.

Segundo Law (3), no geral, as temperaturas calculadas e medidas do aço atingiram valores satisfatórios, mas há certos resultados que precisam de consideração adicional. Como, por exemplo, algumas das temperaturas calculadas para os pilares de Metz e os pilares de Borehamwood são precisamente altas, conforme ilustrado na figura 2.59. Para esses ensaios, as cargas de incêndio foram baixas e é possível que a duração do flamejamento externo tenha sido menor que a duração do incêndio. De acordo com Law (3), ao observar as figuras 2.59 e 2.60, pode-se dizer que algumas das temperaturas dos pilares calculadas para os ensaios dos Laboratórios Underwriters foram baixas e as suas razões não são claras.



a) Pilares sem proteção



b) Pilares protegidos

Figura 2.59: Temperaturas medidas e calculadas dos pilares envolvidos em chamas, considerando-se ventilação natural.



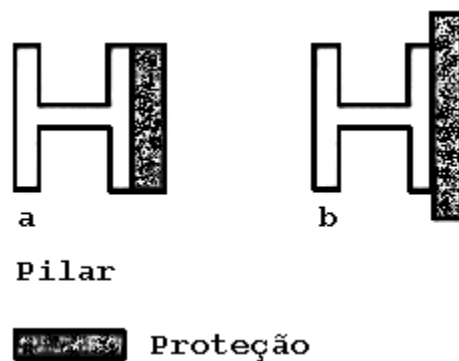


Figura 2.60: Pilares protegidos

A figura 2.61 ilustra as comparações entre as temperaturas calculadas e as medidas de pilares sem proteção em incêndios com ventilação forçada, considerando os ensaios em escala natural. Observa-se que as temperaturas da chama calculadas são geralmente mais baixas que as medidas. Isso acontece porque as temperaturas tiradas a partir de ensaios devem ser suficientemente altas para compensar qualquer erro de medida. Ao comparar o método de cálculo com os outros conjuntos de dados e também com alguns dos dados dos Laboratórios Underwriters, Law (3) conclui que tal método não está seriamente errado.

O Eurocode 3 Part 1-2 (2) determina que deve-se tomar a temperatura da chama,  $T_z$ , como sendo a temperatura no eixo da chama, obtida da expressão 2.38 para o caso de ventilação natural ou da expressão 2.60 sob condições de ventilação forçada. O eixo da chama deve estar a uma distância  $\ell$  da abertura, devendo  $T_z$  ser medido ao longo desse eixo.

Sob condições de ventilação natural, o valor de  $\ell$  deve ser determinado pela fórmula 2.118.



#### 2.2.3.4 Absortividade da Chama

Para um pilar envolvido em chamas, calcula-se o valor de  $a_z$ , absortividade das chamas, a partir equação 2.123:

$$a_z = \frac{\epsilon_{z,1} + \epsilon_{z,2} + \epsilon_{z,3}}{3} \quad (2.123)$$

onde:

$\epsilon_{z,1}$ ,  $\epsilon_{z,2}$  e  $\epsilon_{z,3}$  = emissividades da chama para as faces 1, 2 e 3 do pilar.

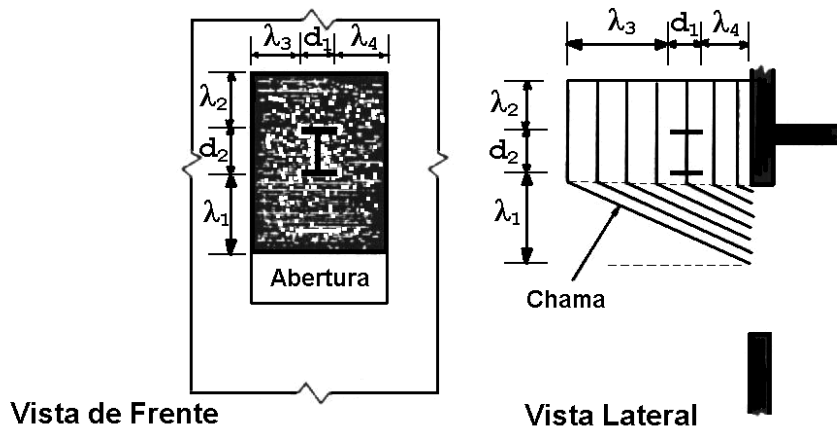
#### 2.2.4 VIGAS TOTALMENTE OU PARCIALMENTE ENVOLVIDAS EM CHAMAS

##### 2.2.4.1 Transferência de Calor por Radiação

###### 2.2.4.1.1 Geral

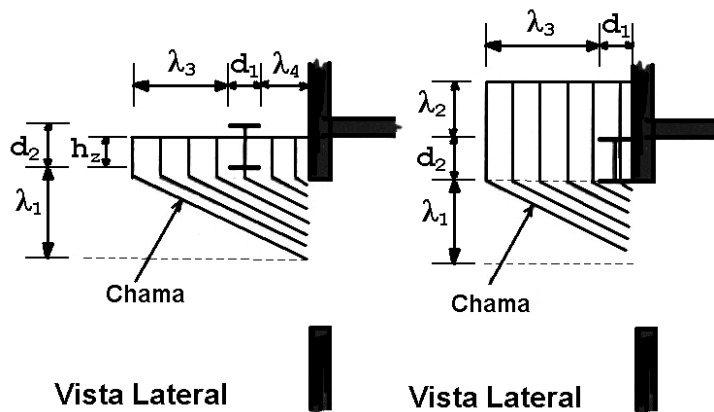
Para o estudo das vigas totalmente ou parcialmente envolvidas em chamas, assume-se que o nível da parte inferior da viga não esteja abaixo do nível do topo das aberturas do compartimento incendiado.

Deve-se distinguir uma viga paralela de uma viga perpendicular à parede externa do compartimento incendiado, conforme ilustra a figura 2.62.



1) Viga perpendicular à parede

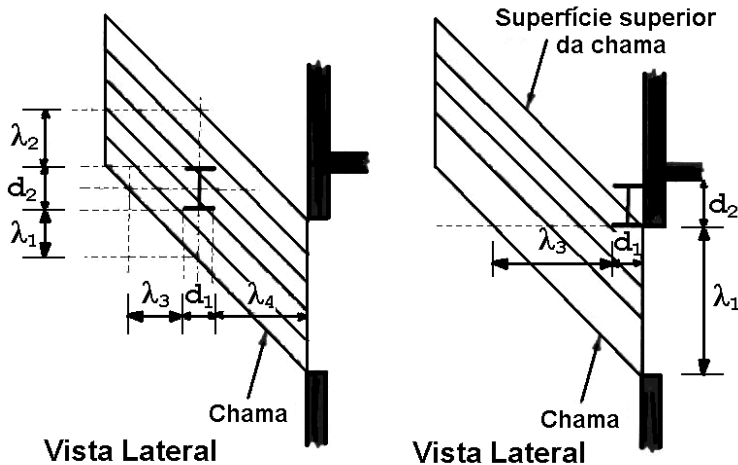
2) Viga paralela à parede



3) Topo da chama abaixo do topo da viga

4) Viga imediatamente adjacente à parede

a) "Sem Ventilação Forçada"



1) Viga não adjacente à parede

2) Viga imediatamente adjacente à parede

b) "Ventilação Forçada"

Figura 2.62: Viga envolvida em chamas

Se a viga estiver paralela à parede externa do compartimento incendiado, determina-se sua temperatura média,  $T_m$ , a partir de um ponto no seu comprimento, de modo que ele esteja diretamente acima do centro da abertura.

Se a viga estiver posicionada perpendicularmente à parede externa do compartimento incendiado, o valor da sua temperatura média deve ser determinado em uma série de pontos ao longo de cada 100mm do comprimento da viga. O valor máximo alcançado deve ser, então, tomado como a temperatura média,  $T_m$ , da peça de aço.

De acordo com Law (3), fizeram-se comparações entre as temperaturas calculadas e medidas de vigas de separação de andares, utilizando ensaios em escala natural nos laboratórios de Borehamwood e Trenton, como ilustrado na figura 2.63. Tais comparações atingiram um alto nível de satisfação. Segundo Law (3), em Trenton, a viga foi protegida como mostrado na figura 2.64 e, nos cálculos, supôs-se que não havia transmissão de calor para as mesas assim também como delas para a vizinhança.

Determina-se o fluxo de calor por radiação das chamas,  $I_z$ , através da seguinte equação:

$$I_z = \frac{(I_{z,1} + I_{z,2})d_1 + (I_{z,3} + I_{z,4})d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (2.124)$$

onde:

$I_{z,j}$  = fluxo de calor por radiação da chama até a face  
j da viga;

j = indicador da face (1), (2), (3) ou (4) da viga.

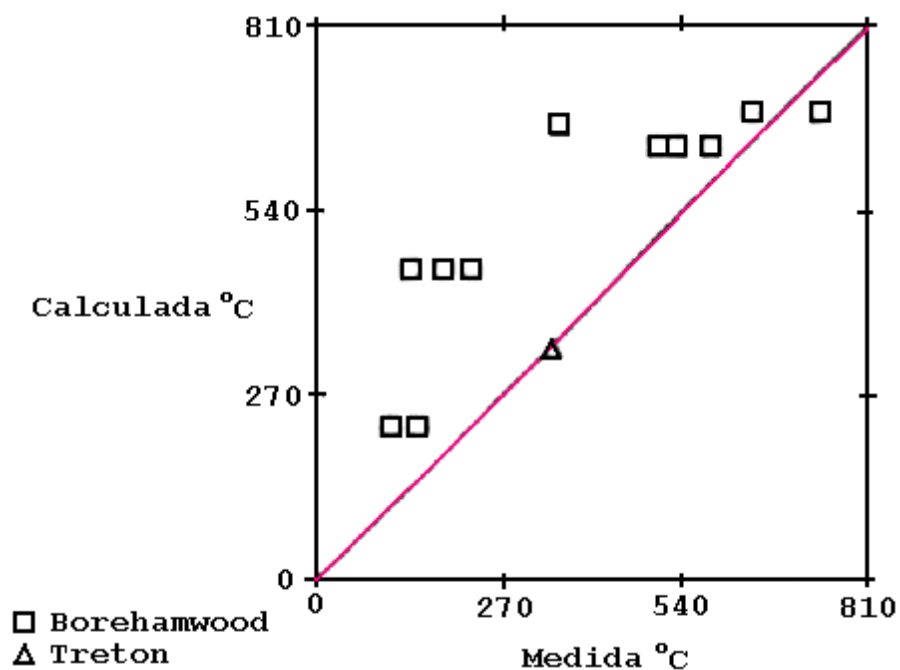


Figura 2.63: Temperaturas medidas e calculadas das vigas de divisão dos andares, envolvidas em chamas, para os testes em escala natural com corrente de ar natural.

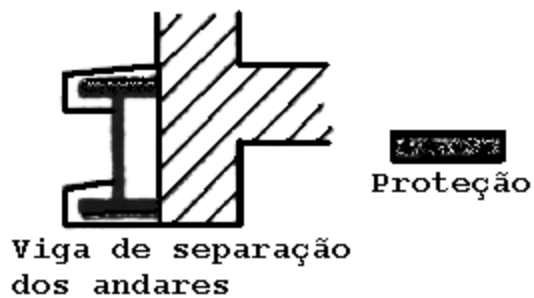


Figura 2.64: Vigas protegidas

#### 2.2.4.1.2 Condição de Ventilação Natural

Para a condição de ventilação natural, deve-se fazer distinção entre os casos onde o topo da chama estiver acima

do nível do topo da viga e as situações onde o topo da chama estiver abaixo desse nível.

Se o topo da chama estiver acima do nível do topo da viga, calcula-se o fluxo de calor por radiação a partir das seguintes equações:

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma (T_o + 273,15)^4 \quad (2.125)$$

$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_{z,2} + 273,15)^4 \quad (2.126)$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (2.127)$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (2.128)$$

onde:

$\varepsilon_{z,j}$  = emissividade da chama em relação à face  $j$  da viga;

$T_o$  = temperatura na abertura,  $[T_o] = ^\circ\text{C}$ ;

$T_{z,1}$  = temperatura da chama no flange inferior da viga,  $[T_{z,1}] = ^\circ\text{C}$ ;

$T_{z,2}$  = temperatura da chama no flange superior da viga,  $[T_{z,2}] = ^\circ\text{C}$ .

No caso de uma viga paralela à parede externa do compartimento incendiado,  $C_4$  pode ser tomado como zero se a viga estiver imediatamente adjacente à parede, assim como ilustra a figura 2.62.

Se o topo da chama estiver abaixo do nível do topo da viga, calcula-se o fluxo de calor por radiação a partir das seguintes equações:

$$I_{z,2} = 0 \quad (2.129)$$

$$I_{z,3} = (h_z / d_2) C_3 \epsilon_{z,3} \sigma [(T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4] / 2 \quad (2.130)$$

$$I_{z,4} = (h_z / d_2) C_4 \epsilon_{z,4} \sigma [(T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_x + 273,15)^4] / 2 \quad (2.131)$$

Para a face 1 da viga, utiliza-se a equação 2.125.

onde:

$T_x$  = temperatura da chama em sua extremidade,  $T_x=813^\circ\text{C}$ ;

$h_z$  = altura até o topo da chama, acima da parte inferior da viga.

#### 2.2.4.1.3 *Condição de Ventilação Forçada*

Para a condição de ventilação forçada, no caso das vigas paralelas à parede externa do compartimento incendiado, distinguem-se aquelas que estão imediatamente adjacentes à parede, daquelas que não estão, conforme a figura 2.62.

Para uma viga paralela à parede, mas não imediatamente adjacente à ela, ou para uma viga perpendicular à parede, calcula-se o fluxo de calor por radiação do seguinte modo:



$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_{z,2} + 273,15)^4 \quad (2.132)$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (2.133)$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (2.134)$$

Para a face 1 da viga, utiliza-se a equação 2.125.

Se a viga estiver paralela à parede e imediatamente adjacente à ela, apenas a parte inferior da face deve ser considerada envolvida pelas chamas, mas um dos lados e o topo devem ser considerados expostos à transferência de calor por radiação proveniente do topo da chama, conforme mostra a figura 2.62 (b) (2). Para esta situação deve-se utilizar as seguintes equações:

$$I_{z,2} = \phi_{z,2} C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_{z,2} + 273,15)^4 \quad (2.135)$$

$$I_{z,3} = \phi_{z,3} C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (2.136)$$

$$I_{z,4} = 0 \quad (2.137)$$

onde:

$\phi_{z,j}$  = fator de configuração relativo à superfície superior da chama, para a face  $j$  da viga.

#### 2.2.4.2 Emissividade da Chama

Determina-se a emissividade da chama,  $\epsilon_{z,j}$ , para cada uma das faces 1, 2, 3 e 4 da viga a partir da expressão  $\epsilon_z = 1 - e^{-0,3\lambda}$ , usando a espessura da chama,  $\lambda$ , igual à dimensão  $\lambda_j$ , correspondente à face  $j$  da viga, conforme a figura 2.62.

#### 2.2.4.3 Absortividade da Chama

Deve-se calcular a absortividade da chama,  $a_z$ , a partir da seguinte equação:

$$a_z = 1 - e^{-0,3h} \quad (2.138)$$

### **3 SÍNTESE PARA A DETERMINAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS EXTERNOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

O objetivo deste capítulo é fornecer uma síntese do capítulo anterior citando apenas as fórmulas básicas para se chegar à temperatura final do aço na estrutura externa. A simbologia e as explicações já fornecidas não serão escritas novamente, porém deve-se ressaltar que todas elas serão mantidas.

#### **3.2 DIMENSÕES DO COMPARTIMENTO DE INCÊNDIO**

##### **3.2.1 COMPARTIMENTO SIMPLES DE INCÊNDIO**

Para um compartimento de incêndio em sua forma mais simples, conforme ilustra a figura 2.2, têm-se as seguintes fórmulas para o cálculo de suas dimensões:

$$A_F = W_1 \cdot W_2 \quad (3.1)$$

$$A_\omega = \omega \cdot h \quad (3.2)$$

$$A_T = 2A_F + 2H(W_1 + W_2) - A_{\omega} \quad (3.3)$$

$$D / W = W_2 / W_1 \quad (3.4)$$

### 3.2.2 COMPARTIMENTO COM MAIS QUE UMA JANELA

Um compartimento com mais que uma janela na parede encontra-se ilustrado na figura 2.3. Calculam-se as suas dimensões como a seguir:

$$A_1 = \omega_1 h_1 \quad ; \quad A_2 = \omega_2 h_2 \quad \text{etc} \quad (3.5)$$

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 + \text{etc} \quad (3.6)$$

$$A_{\omega} = A_1 + A_2 + \text{etc} \quad (3.7)$$

$$h = \frac{A_1 h_1 + A_2 h_2 + \text{etc}}{A_{\omega}} \quad (3.8)$$

### 3.2.3 COMPARTIMENTO COM JANELAS EM MAIS QUE UMA PAREDE

Este caso encontra-se ilustrado na figura 2.4. Suas dimensões são calculadas a partir das seguintes fórmulas:

$$A_{\omega} = A_{\omega 1} + A_{\omega 2} + \text{etc} \quad (3.9)$$

$$D / W = \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{A_{\omega 1}}{A_{\omega 2}} \quad (3.10)$$

### 3.2.4 COMPARTIMENTO COM UM NÚCLEO

Havendo um núcleo no compartimento incendiado, de acordo com a figura 2.5, utilizam-se as equações que seguem:

$$A_F = W_1 W_2 - c_1 c_2 \quad (3.11)$$

$$A_T = 2A_F + 2H(W_1 + W_2 + c_1 + c_2) - A_{\omega} \quad (3.12)$$

$$D / W = \frac{(W_2 - c_2)}{(W_1 - c_1)} \cdot \frac{A_{\omega 1}}{A_{\omega}} \quad (3.13)$$

## 3.3 CARACTERÍSTICAS DO INCÊNDIO E DA CHAMA

### 3.3.1 VENTILAÇÃO NATURAL

#### 3.3.1.1 Taxa de Queima

Deve-se calcular a taxa de queima,  $R$ , através da equação 3.14 e também da equação 3.15, cuja curva está representada na figura 2.12:

$$R = \frac{L}{t_F} \quad (3.14)$$

$$R = \left[ 0,18(1 - e^{-0,036\eta}) A_{\omega} \left( h \frac{W}{D} \right)^{1/2} \right] \quad (3.15)$$

onde:

$$\eta = \frac{A_T}{A_{\omega} h^{1/2}}$$

Ressalta-se que, caso o resultado da equação 3.15 seja de menor valor, significa que há a condição de ventilação controlada, uma vez que a duração do incêndio,  $t_F$ , na equação 3.14 é sob condições de queima-livre.

### 3.3.1.2 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

Determina-se a temperatura do incêndio dentro do compartimento utilizando-se a equação a seguir:

$$T_f = 6000 \frac{(1 - e^{-0,1\eta})}{\eta^{1/2}} (1 - e^{-0,05\Psi}) + 20 \quad (3.16)$$

onde:

$$\Psi = L / (A_{\omega} A_T)^{1/2}$$

### 3.3.1.3 Altura da Chama

Deve-se utilizar a equação a seguir para o cálculo da altura da chama,  $z$ :

$$z + h = 12,8 \left[ \frac{R}{\omega} \right]^{2/3} \quad (3.17)$$

Caso haja um toldo ou uma sacada localizada no nível do topo da janela, em toda a sua largura, ocasionando uma projeção horizontal igual a  $h_a$ , conforme mostra a figura 2.17, então deve-se modificar o valor de  $z$ , dado pela fórmula 3.17, como a seguir:

- considerando parede acima da janela e  $h \leq 1,25\omega$ , diminui-se  $z$  por  $h_a\sqrt{2}$ ;
- sem parede acima da janela, ou para a situação  $h > 1,25\omega$ , diminui-se  $z$  por  $h_a$ ;

#### 3.3.1.4 Largura da Chama

Considera-se que a largura da chama seja igual à largura da própria janela, conforme pode-se observar na figura 2.15.

#### 3.3.1.5 Profundidade da Chama

De acordo com a figura 2.15, a profundidade da chama é 2/3 da altura da janela, ou seja,  $2h/3$ .

### 3.3.1.6 Projeção Horizontal da Chama

Havendo parede acima da janela, calcula-se a projeção horizontal da chama de acordo com as seguintes situações:

- para  $h \leq 1,25\omega$ :  $\chi = h / 3$  (3.18)

- para  $h > 1,25\omega$  e a distância a qualquer outra janela maior que  $4\omega$ :  $\chi = 0,3h(h / \omega)^{0,54}$  (3.19)

- outros casos:  $\chi = 0,454h(h / 2\omega)^{0,54}$  (3.20)

Não havendo parede acima da janela, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\chi = 0,6h(z / h)^{1 / 3} \quad (3.21)$$

### 3.3.1.7 Comprimento da Chama ao longo do Eixo



Deve-se calcular o valor de  $X$ , comprimento da chama ao longo do eixo, utilizando-se a fórmula 3.22 ou 3.23, de acordo com a situação:

- parede acima da janela e ainda na condição de  $h \leq 1,25\omega$ :

$$X = z + h / 2 \quad (3.22)$$

- sem parede acima da janela ou, se houver parede, para o caso de  $h > 1,25\omega$ :

$$X = \left[ z^2 + (\chi - h / 3)^2 \right]^{1/2} + h / 2 \quad (3.23)$$

#### 3.3.1.8 Temperatura da Chama na Janela

$$T_o = 518 / [1 - 0,027(X \cdot \omega / R)] + 20 \quad (3.24)$$

#### 3.3.1.9 Emissividade na Janela

A emissividade na janela é um termo adimensional e unitário:

$$\varepsilon_f = 1 \quad (3.25)$$

#### 3.3.1.10 Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo

Determina-se a temperatura da chama em um determinado ponto do seu eixo, usando a seguinte equação:

$$T_z = (T_o - T_a)[1 - 0,027(\ell \cdot \omega / R)] + 20 \quad (3.26)$$

Para os pilares envolvidos ou não em chamas e para as vigas não envolvidas, obtém-se o valor de  $\ell$  através da seguinte equação:

$$\ell = h / 2 \quad (3.27)$$

Para as vigas totalmente ou parcialmente envolvidas em chamas, determina-se a temperatura da chama no flange inferior e no flange superior,  $T_{z,1}$  e  $T_{z,2}$  respectivamente.  $T_{z,1}$  e  $T_{z,2}$  são calculadas através da equação 3.26 e o valor de  $\ell$  é medido da janela até o ponto onde o cálculo for feito.

#### 3.3.1.11 Emissividade da Chama

Calcula-se a emissividade das chamas que emergem das janelas através da equação 3.28:

$$\epsilon_z = 1 - e^{-0,30\lambda} \quad (3.28)$$

Estando o pilar em frente a uma abertura, utiliza-se a espessura das chamas,  $\lambda$ , no nível do topo das aberturas.

Desde que não haja toldo ou sacada acima da abertura,  $\lambda$  pode ser obtido através da relação 3.29:

$$\lambda = 2h / 3 \quad (3.29)$$

Se o pilar estiver situado entre duas aberturas, as emissividades totais  $\varepsilon_{z,m}$  e  $\varepsilon_{z,n}$  das chamas nas faces m e n devem ser determinadas a partir da expressão 3.28, onde calcula-se  $\lambda$  como segue:

- para a face m: 
$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_j \quad (3.30)$$

- para a face n: 
$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_j \quad (3.31)$$

sendo que obtém-se a espessura da chama na abertura j,  $\lambda_j$ , através da seguinte fórmula:

$$\lambda_j = \omega_j \quad (3.32)$$

### 3.3.2 VENTILAÇÃO FORÇADA

#### 3.3.2.1 Taxa de Queima

Sob condições de ventilação forçada, utiliza-se a fórmula 3.14 para o cálculo da taxa de queima, isto é,  $R = L / \tau_F$ .

#### 3.3.2.2 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

Obtém-se o valor do parâmetro  $T_f$ , temperatura do incêndio dentro do compartimento, a partir da equação 3.33, cuja curva pode ser analisada na figura 2.20:

$$T_f = 1200(1 - e^{-0,04\Psi}) + 20 \quad (3.33)$$

### 3.3.2.3 Altura da Chama

Neste trabalho, a equação utilizada para o cálculo da altura da chama será a publicada pelo Eurocode 3, Part 1-2 (2):

$$z = 23,9 \left( \frac{1}{u} \right)^{0,43} \left( \frac{R}{A_{\omega}^{1/2}} \right) - h \quad (3.34)$$

### 3.3.2.4 Projeção Horizontal da Chama

A equação 3.35 é a apropriada ao cálculo da projeção horizontal da chama, sendo que sua curva encontra-se traçada na figura 2.23:

$$\chi = 0,61 \left[ \frac{u^2}{h} \right]^{0,22} (z + h) \quad (3.35)$$

### 3.3.2.5 Largura da Chama

Pode-se observar a largura máxima das chamas emergentes na figura 2.24 e calculá-la utilizando a seguinte equação:

$$\omega_z \cong \omega + 0,4\chi \quad (3.36)$$

#### 3.3.2.6 Comprimento da Chama ao longo do Eixo

Pode-se calcular o comprimento da chama a partir de simples considerações geométricas, como ilustrado na figura 2.22. Logo, obtém-se o valor de X com o uso da seguinte equação:

$$X = \left( z^2 + \chi^2 \right)^{1/2} \quad (3.37)$$

#### 3.3.2.7 Temperatura da Chama na Janela

Calcula-se a temperatura da chama na janela de acordo com a equação 3.38, apresentada pelo Eurocode 3, Part 1-2 (2):

$$T_o = 518 \left[ 1 - 0,019X(A_\omega)^{1/2} / R \right] + 20 \quad (3.38)$$

#### 3.3.2.8 Emissividade na Janela

Aqui também utiliza-se a equação 3.25, ou seja,  $\epsilon_f = 1$ .

### 3.3.2.9 Temperatura da Chama ao longo do Eixo

Calcula-se a temperatura da chama ao longo do seu eixo a partir da relação 3.39:

$$T_z = \left[ 1 - 0,019 \frac{\ell(A\omega)^{1/2}}{R} \right] (T_o - 20) + 20 \quad (3.39)$$

Calcula-se o valor de  $\ell$  de acordo com a situação e o tipo de peça.

#### 3.3.2.9.1 Pilares não Envolvidos em Chamas

Para o pilar em frente a uma abertura, tem-se:

$$\ell = 0 \quad (3.40)$$

Para o pilar situado entre aberturas e desde que não haja toldo ou sacada acima da abertura, pode-se calcular o valor de  $\ell$  através de equação seguinte:

$$\ell = SX / \chi \quad (3.41)$$

sendo que a dimensão S encontra-se ilustrada nas figuras 2.27 e 2.28.

### 3.3.2.9.2 Vigas não Envolvidas em Chamas

Para uma viga paralela à parede externa do compartimento incendiado, estando ela acima de uma abertura, usa-se a equação 3.40.

Para uma viga perpendicular à parede externa do compartimento incendiado, estando ela entre aberturas, obtém-se o valor de  $l$  a partir da equação 3.41, desde que não haja toldo ou sacada acima da abertura.

### 3.3.2.9.3 Pilares Envolvidos em Chamas

Desde que não haja sacada ou toldo acima da abertura, pode-se calcular o valor de  $l$  como a seguir:

$$l = (\lambda_3 + 0,5d_1)X / \chi \quad (3.42)$$

$$\text{mas } l \leq 0,5hX / z$$

onde  $l$  é a distância do eixo da chama até o nível onde  $\lambda_3$  for medido.

Os parâmetros da equação 3.42 encontram-se ilustrados na figura 2.58.

### 3.3.2.9.4 Vigas Totalmente ou Parcialmente Envolvidas em Chamas

Para esta situação, determina-se a temperatura da chama no flange inferior e no flange superior,  $T_{z,1}$  e  $T_{z,2}$  respectivamente. Os valores de  $T_{z,1}$  e  $T_{z,2}$  são calculados através da equação 3.39 e o valor de  $\ell$  é medido da janela até o ponto onde o cálculo for feito.

#### 3.3.2.10 Emissividade da Chama

Sob condições de ventilação forçada, determina-se a emissividade da chama,  $\varepsilon_z$ , a partir da equação 3.28. Porém, para o pilar em frente a uma abertura, tem-se a equação seguinte para a determinação de  $\lambda$ :

$$\lambda = \chi \quad \text{mas} \quad \lambda \leq h\chi / z \quad (3.43)$$

Se o pilar estiver situado entre duas aberturas, utilizam-se as equações 3.30 e 3.31 para o cálculo de  $\lambda$ . Entretanto a espessura da chama  $\lambda_j$  passa a ser calculada pela fórmula a seguir:

$$\lambda_j = \omega_j + 0,4S \quad (3.44)$$

### 3.4 EQUILÍBRIO TÉRMICO



### 3.4.1 PEÇAS NÃO ENVOLVIDAS EM CHAMAS

Para uma peça não envolvida em chamas, determina-se a temperatura média do aço,  $T_s$ , a partir da solução da seguinte equação de equilíbrio térmico:

$$\sigma(T_s + 273,15)^4 + \alpha_z(T_s + 273,15) = \Sigma I_z + \Sigma I_f + 293\alpha_z \quad (3.45)$$

onde:

$$\sigma = 56,7 \times 10^{-12} \text{ kW } / (\text{m}^2 \cdot \text{°C}^4);$$

#### 3.4.1.1 Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas

Deve-se determinar o fluxo de calor por radiação proveniente de uma abertura, utilizando-se a seguinte equação:

$$I_f = \phi_f \varepsilon_f (1 - a_z) \sigma (T_f + 273,15)^4 \quad (3.46)$$

#### 3.4.1.2 Fluxo de Calor por Radiação das Chamas

Para peças não envolvidas em chamas, o valor de  $I_z$  é determinado de acordo com o tipo de peça.

- Para pilares:

- se o pilar estiver em frente a uma abertura, conforme ilustra a figura 2.52, tem-se a equação 3.47:

$$I_z = \phi_z \varepsilon_z \sigma (T_z + 273,15)^4 \quad (3.47)$$

- se o pilar estiver situado entre aberturas, de acordo com a figura 2.53, deve-se determinar o valor de  $I_z$ , em cada face, como a seguir:

$$I_z = (\phi_{z,m} \varepsilon_{z,m} + \phi_{z,n} \varepsilon_{z,n}) \sigma (T_z + 273,15)^4 \quad (3.48)$$

– Para vigas:

- se a viga estiver paralela à parede externa do compartimento, deve-se calcular o valor de  $I_z$  através da equação 3.47;
- se a viga estiver perpendicular à parede externa do compartimento incendiado, utiliza-se a equação 3.48 para o cálculo do fluxo de calor por radiação,  $I_z$ , proveniente das chamas.

#### 3.4.1.3 Convecção das Chamas e Gases Quentes

Quando há ventilação natural, tem-se o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $\alpha_z$ , através da seguinte equação:

$$\alpha_z = 0,026 \left[ \frac{R}{A_\omega} \right]^{0,6} \left[ \frac{1}{d} \right]^{0,4} \quad (3.49)$$

Quando se tratar de situações com ventilação forçada, deve-se usar a equação 3.50 para o cálculo de  $\alpha_z$ :

$$\alpha_z = 0,0098 \left[ \frac{1}{d} \right]^{0,4} \left[ \frac{R}{A_\omega} + \frac{u}{1,6} \right]^{0,6} \quad (3.50)$$

sendo:

$d = (d_1 + d_2)/2$ , com  $d_1$  e  $d_2$  representados nas figuras 2.27 e 2.28.

#### 3.4.1.4 Absortividade das Chamas

Para condições de ventilação natural, considera-se a absortividade da chama,  $a_z$ , igual a zero. Porém, sob condições de ventilação forçada, deve-se considerar  $a_z$  igual à emissividade da chama,  $\epsilon_z$ .

#### 3.4.2 PEÇAS ENVOLVIDAS EM CHAMAS

Para uma peça envolvida em chamas, obtém-se a temperatura média do aço,  $T_s$ , a partir da solução da seguinte equação de equilíbrio térmico:

$$\sigma(T_s + 273,15)^4 + \alpha_z(T_s + 273,15) = I_z + I_f + \alpha_z(T_z + 273,15) \quad (3.51)$$

### 3.4.2.1 Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas

Determina-se o fluxo de calor por radiação proveniente de uma abertura, utilizando-se equação 3.46.

### 3.4.2.2 Fluxo de Calor por Radiação das Chamas

Também para as peças envolvidas em chamas, determina-se o fluxo de calor por radiação de acordo com o tipo de peça.

#### 3.4.2.2.1 Pilares Envolvidos em Chamas

$$I_z = \frac{(I_{z,1} + I_{z,2})d_1 + (I_{z,3} + I_{z,4})d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (3.52)$$

com:

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma (T_z + 273,15)^4;$$

$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_z + 273,15)^4;$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma (T_o + 273,15)^4;$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma (T_z + 273,15)^4;$$

sendo que:

- $T_o$  é obtida da equação 3.24, caso a situação seja de ventilação natural ou da equação 3.38 sob condições de ventilação forçada;
- $T_z$  é obtida da equação 3.26 para o caso de ventilação natural ou da equação 3.39 se a situação for de ventilação forçada.

#### 3.4.2.2.2. Vigas Totalmente ou Parcialmente Envolvidas em Chamas

Determina-se o fluxo de calor por radiação das chamas,  $I_z$ , através da equação 3.52.

##### 3.4.2.2.2.1 Ventilação Natural

Sob condições de ventilação natural, podem-se ter duas situações distintas:

- Se o topo da chama estiver acima do nível do topo da viga, calcula-se o fluxo de calor por radiação a partir das equações a seguir:

$$I_{z,1} = C_1 \epsilon_{z,1} \sigma (T_o + 273,15)^4 \quad (3.53)$$

$$I_{z,2} = C_2 \epsilon_{z,2} \sigma (T_{z,2} + 273,15)^4 \quad (3.54)$$

$$I_{z,3} = C_3 \epsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (3.55)$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (3.56)$$

sendo que o valor de  $T_{z,1}$  é medido no nível da parte inferior da viga e  $T_{z,2}$  no nível do topo da viga.

Deve-se lembrar que, no caso de uma viga paralela à parede externa do compartimento incendiado,  $C_4$  pode ser tomado como zero se a viga estiver imediatamente adjacente à parede, conforme ilustra a figura 2.62.

- Se o topo da chama estiver abaixo do nível do topo da viga, calcula-se o fluxo de calor por radiação a partir das equações a seguir:

$$I_{z,2} = 0 \quad (3.57)$$

$$I_{z,3} = (h_z / d_2) C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (3.58)$$

$$I_{z,4} = (h_z / d_2) C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (1086,15)^4 \right] / 2 \quad (3.59)$$

Para a face 1 da viga, utiliza-se a equação 3.53.

#### 3.4.2.2.2 Ventilação Forçada

Sob condições de ventilação forçada, calcula-se o fluxo de calor por radiação da chama de acordo com o posicionamento das vigas, conforme a figura 2.62:

- Para uma viga paralela à parede, mas não imediatamente adjacente à ela, ou para uma viga perpendicular à parede, tem-se:

$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_{z,2} + 273,15)^4 \quad (3.60)$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (3.61)$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (3.62)$$

Para a face 1 da viga, utiliza-se a equação 3.53.

- Para a viga paralela à parede e imediatamente adjacente à ela, conforme mostra a figura 2.62(b)(2), devem-se utilizar as seguintes equações:

$$I_{z,2} = \phi_{z,2} C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_{z,2} + 273,15)^4 \quad (3.63)$$

$$I_{z,3} = \phi_{z,3} C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (3.64)$$

$$I_{z,4} = 0 \quad (3.65)$$

#### 3.4.2.3 Convecção das Chamas e Gases Quentes

Para a situação de ventilação natural, calcula-se  $\alpha_z$  através da equação 3.49 e sob condições de ventilação forçada, a partir da equação 3.50.

#### 3.4.2.4 Absortividade das Chamas

- Para pilares envolvidos em chamas:

$$a_z = \frac{\epsilon_{z,1} + \epsilon_{z,2} + \epsilon_{z,3}}{3} \quad (3.66)$$

- Para vigas totalmente ou parcialmente envolvidas em chamas:

$$a_z = 1 - e^{-0,3h} \quad (3.67)$$

### 3.5 FATOR DE CONFIGURAÇÃO

Determina-se o valor do fator de configuração em um ponto central, P, conforme a figura 2.40.

Calcula-se, então, os valores de a e b para cada face da peça:

$$\left. \begin{aligned} a &= h' / S' \\ b &= \omega' / S' \end{aligned} \right\} \quad (3.68)$$



Se a superfície receptora estiver paralela à superfície irradiante, de acordo com a figura 2.41, a contribuição de cada região deve ser determinada como a seguir:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{a}{(1+a^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{b}{(1+a^2)^{0,5}} \right] + \frac{b}{(1+b^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{a}{(1+b^2)^{0,5}} \right] \right\} \quad (3.69)$$

Se a superfície receptora estiver perpendicular à superfície irradiante, conforme ilustra a figura 2.42, calcula-se a contribuição de cada região como a seguir:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left\{ \operatorname{tag}^{-1}(a) - \frac{1}{(1+b^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{a}{(1+b^2)^{0,5}} \right] \right\} \quad (3.70)$$

Estando a superfície receptora em um plano que forma um ângulo  $\theta$  com a superfície irradiante, de acordo com a figura 2.43, tem-se o valor de cada contribuição como a seguir:

$$\begin{aligned}
\phi = & \frac{1}{2\pi} \left\langle \operatorname{tag}^{-1}(a) - \frac{(1 - b \cos \theta)}{(1 + b^2 - 2b \cos \theta)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \times \right. \\
& \times \left[ \frac{a}{(1 + b^2 - 2b \cos \theta)^{0,5}} \right] + \frac{a \cos \theta}{(a^2 + \operatorname{sen}^2 \theta)^{0,5}} \times \\
& \times \left. \left\{ \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{(b - \cos \theta)}{(a^2 + \operatorname{sen}^2 \theta)^{0,5}} \right] + \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{\cos \theta}{(a^2 + \operatorname{sen}^2 \theta)^{0,5}} \right] \right\} \right\rangle \quad (3.71)
\end{aligned}$$

### 3.6 FATOR DE CONFIGURAÇÃO TOTAL

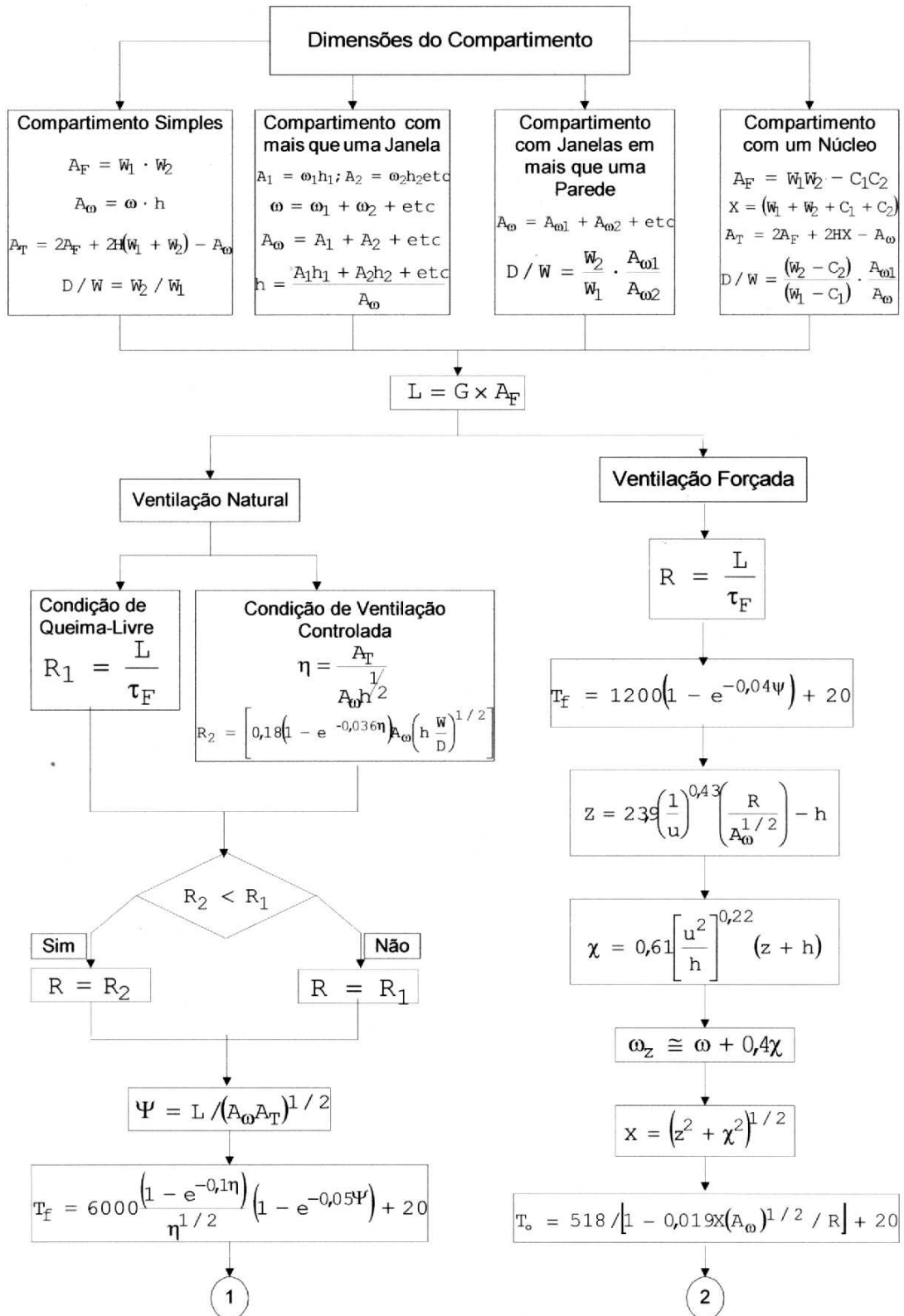
Tendo-se transferência de calor por radiação de uma abertura, calcula-se o  $\phi_f$  de uma peça a partir da equação 3.72:

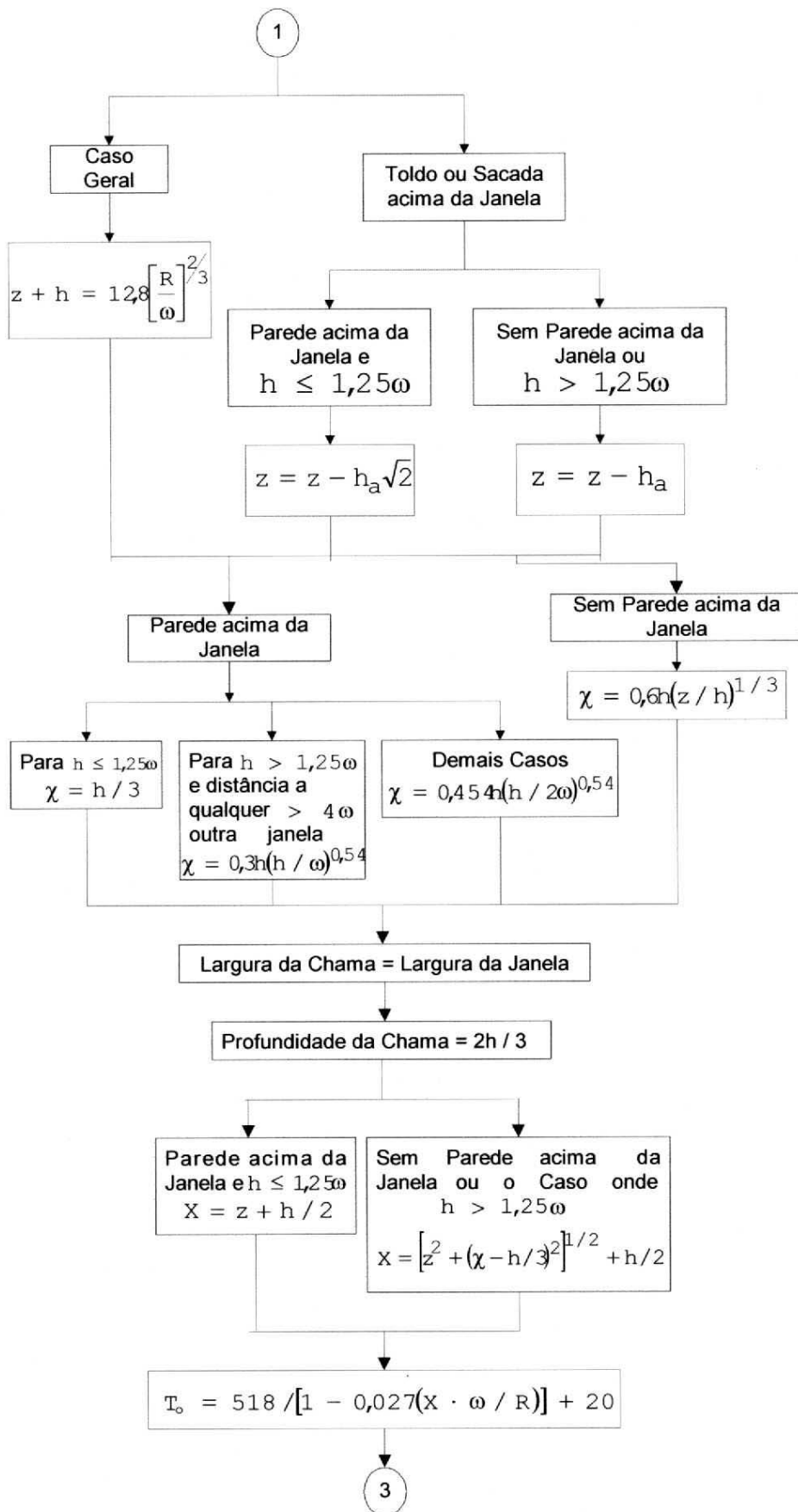
$$\phi_f = \frac{(C_1\phi_{f,1} + C_2\phi_{f,2})d_1 + (C_3\phi_{f,3} + C_4\phi_{f,4})d_2}{(C_1 + C_2)d_1 + (C_3 + C_4)d_2} \quad (3.72)$$

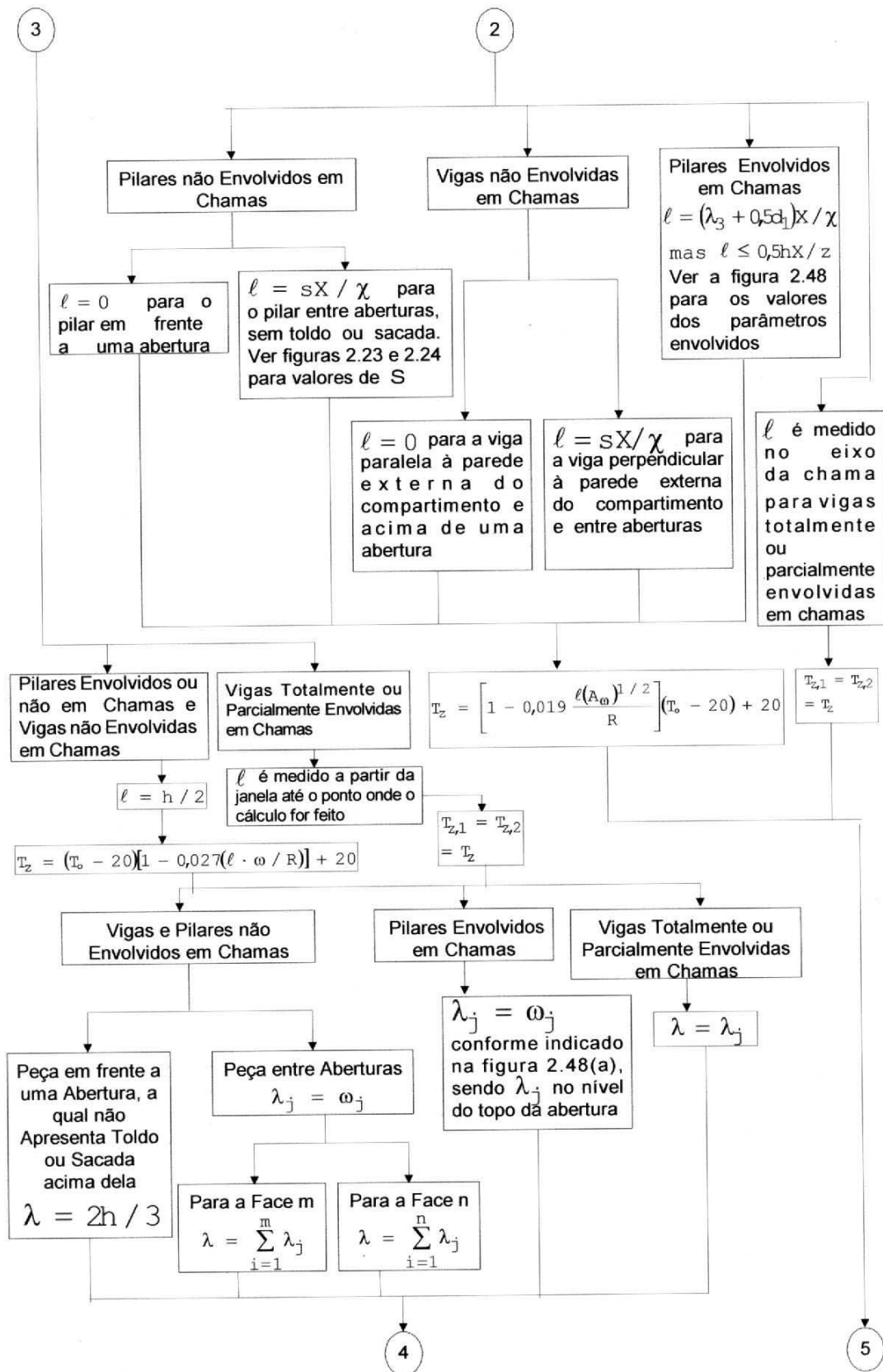
Considerando-se transferência de calor por radiação das chamas, determina-se o  $\phi_z$  de uma peça como a seguir:

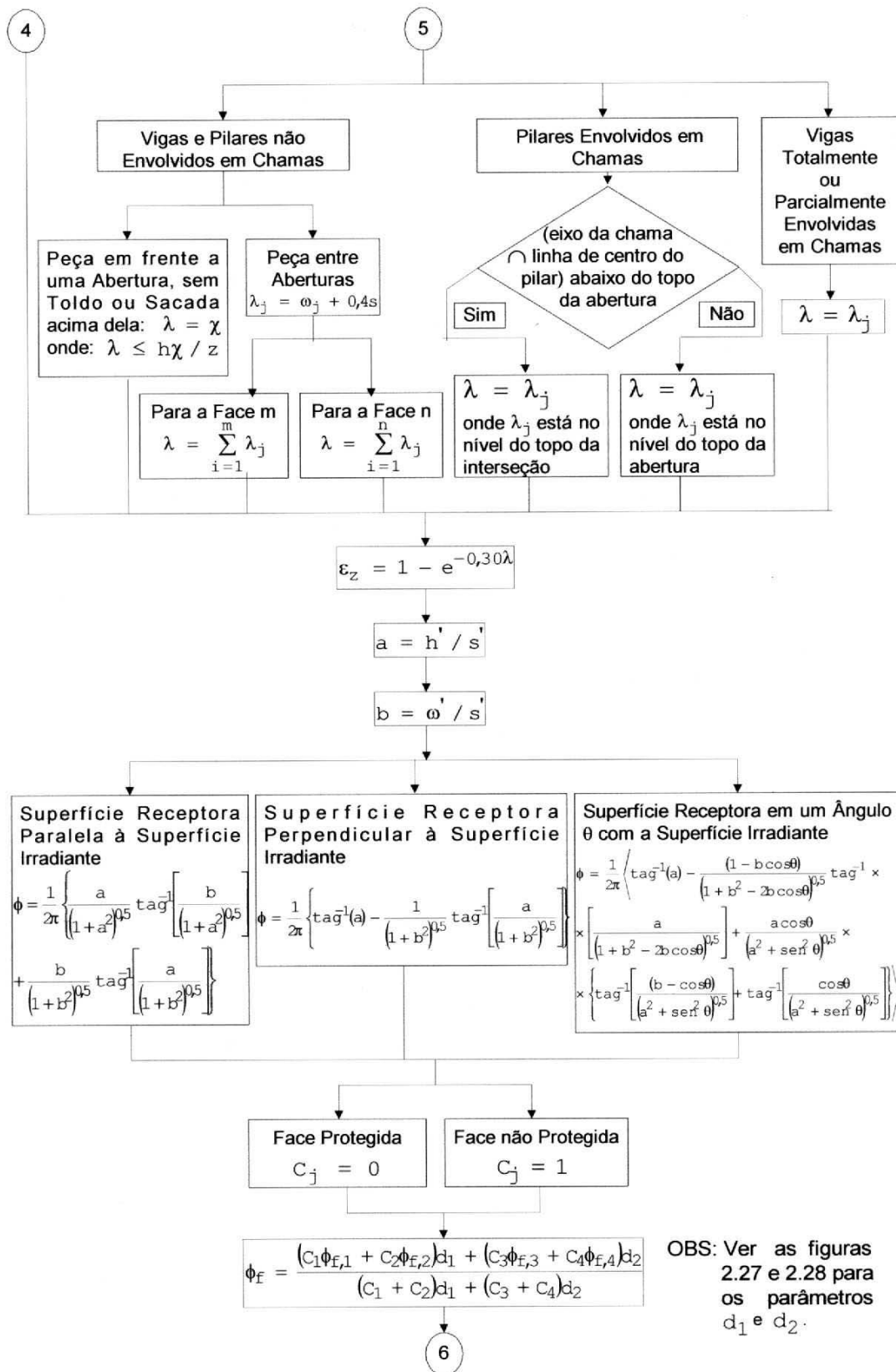
$$\phi_z = \frac{(C_1\phi_{z,1} + C_2\phi_{z,2})d_1 + (C_3\phi_{z,3} + C_4\phi_{z,4})d_2}{(C_1 + C_2)d_1 + (C_3 + C_4)d_2} \quad (3.73)$$

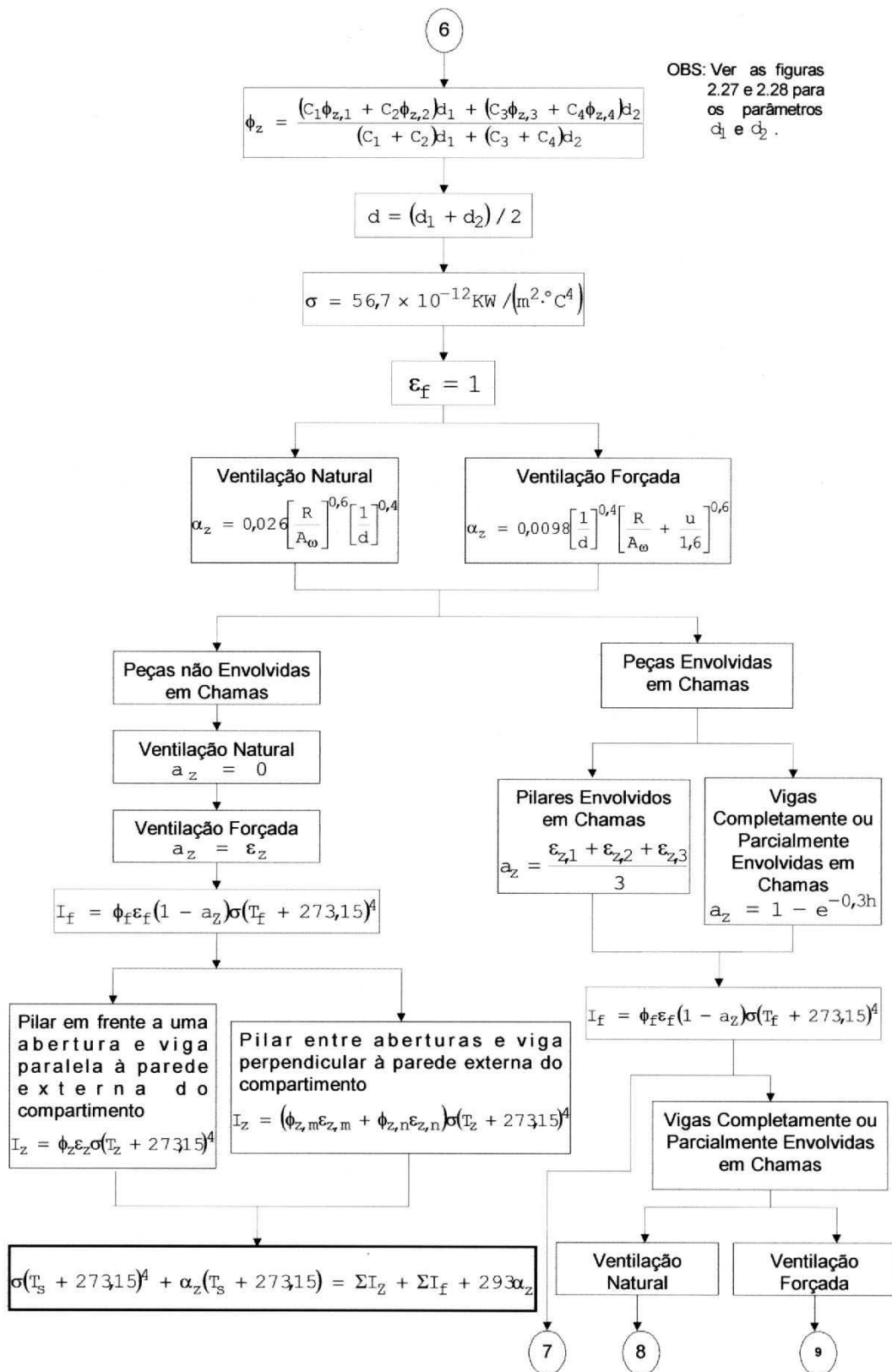
### 3.7 FLUXOGRAMA

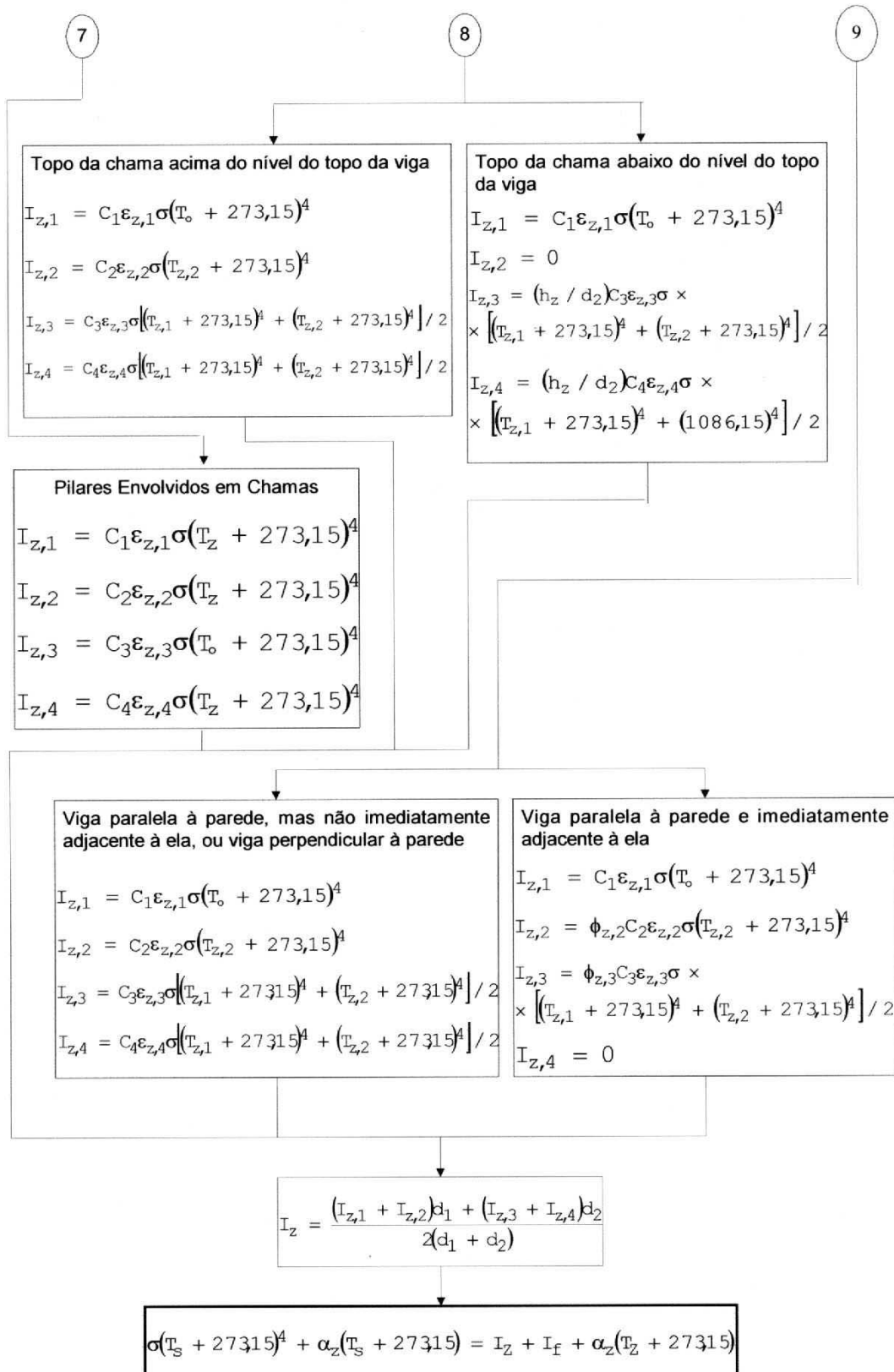














### 3.8 EXEMPLOS

3.8.1 AQUECIMENTO DE PILAR EXTERNO SENDO A ABERTURA 12 x 3m E A DISTÂNCIA DO PILAR AO COMPARTIMENTO IGUAL A 0,5m

Para a exemplificação de pilar, utiliza-se um perfil soldado série CS-400x128.

#### 3.8.1.1 Dimensões do Compartimento

Considera-se um compartimento simples de incêndio, com dimensões  $W_1=12m$ ,  $W_2=40m$  e  $H=3m$ . A janela do compartimento possui 12m de largura por 3m de altura, conforme a figura 3.1.

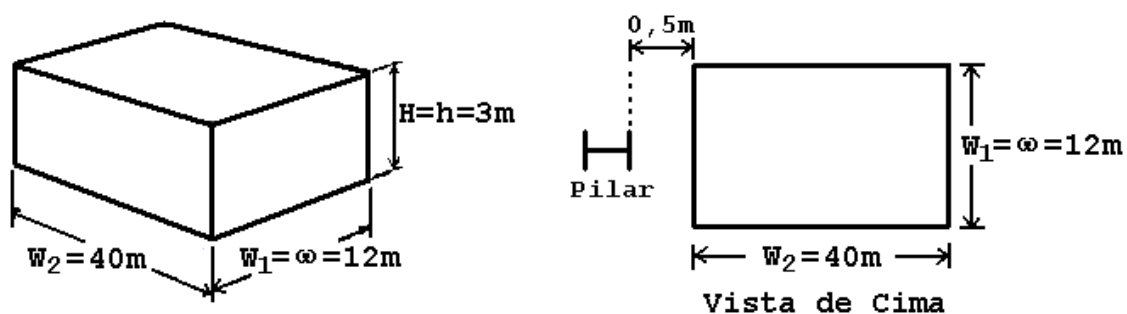


Figura 3.1: Dimensões do compartimento

$$A_F = 12 \times 40 = 480m^2$$

$$A_\omega = 12 \times 3 = 36m^2$$

$$A_T = 2 \times 480 + 2 \times 3(12 + 40) - 36 = 1236m^2$$

$$D / W = 40 / 12 = 10 / 3$$

### 3.8.1.2. Carga Total de Incêndio

Considera-se uma densidade de carga de incêndio  $G = 50\text{kg/m}^2$ .

$$L = 50 \times 480 = 24000\text{kg}$$

### 3.8.1.3 Sob Condições de Ventilação Natural

#### 3.8.1.3.1 *Condição de Queima-Livre*

$$R_1 = \frac{L}{\tau_F} = \frac{24000}{1200} = 20\text{kg / s}$$

#### 3.8.1.3.2 *Condição de Ventilação Controlada*

$$\eta = \frac{1236}{36 \times 3^{1/2}} = 19,822\text{m}^{-1/2}$$

$$R_2 = \left[ 0,18 \left( 1 - e^{-0,036 \times 19,822} \right) \times 36 \left( 3 \times \frac{3}{10} \right)^{1/2} \right] = 3,136 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

#### 3.8.1.3.3 *Taxa de Queima*

$$R_2 < R_1 \Rightarrow R = R_2 = 3,136 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \Rightarrow \text{Condição de ventilação controlada}$$

#### 3.8.1.3.4 *Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento*

$$\Psi = \frac{24000}{(36 \times 1236)^{1/2}} = 113,776 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$T_f = 6000 \frac{(1 - e^{-0,1 \times 19,822})}{19,822^{1/2}} (1 - e^{-0,05 \times 113,776}) + 20 = 1178,059^\circ\text{C}$$

#### 3.8.1.3.5 *Altura da Chama*

Considera-se a ausência de toldo ou sacada acima da janela.

$$z = 12,8 \left[ \frac{3,136}{12} \right]^{2/3} - 3 = 2,232\text{m}$$

#### 3.8.1.3.6 *Projeção Horizontal da Chama*

Considera-se não haver parede acima da janela.

$$\chi = 0,6 \times 3(2,232 / 3)^{1/3} = 1,631\text{m}$$

#### 3.8.1.3.7 *Largura da Chama*

Largura da chama = 12m

#### 3.8.1.3.8 *Profundidade da Chama*

Profundidade da chama =  $2 \times 3 / 3 = 2\text{m}$

#### 3.8.1.3.9 *Comprimento da Chama ao longo do Eixo*

$$X = \left[ 2,232^2 + (1,631 - 3 / 3)^2 \right]^{1/2} + 3 / 2 = 3,819\text{m}$$

3.8.1.3.10 *Temperatura da Chama na Janela*

$$T_o = 518 / [1 - 0,027(3,819 \times 12 / 3,136)] + 20 = 875,583^\circ\text{C}$$

3.8.1.3.11 *Emissividade na Janela*

$$\epsilon_f = 1$$

3.8.1.3.12 *Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo*

$$l = h / 2 = 3 / 2\text{m}$$

$$T_z = (875,583 - 20) \left[ 1 - 0,027 \left( \frac{3}{2} \times \frac{12}{3,136} \right) \right] + 20 = 742,989^\circ\text{C}$$

Logo, com os parâmetros anteriormente calculados, sabe-se que o pilar encontra-se envolvido em chamas, de acordo com a figura 3.2.

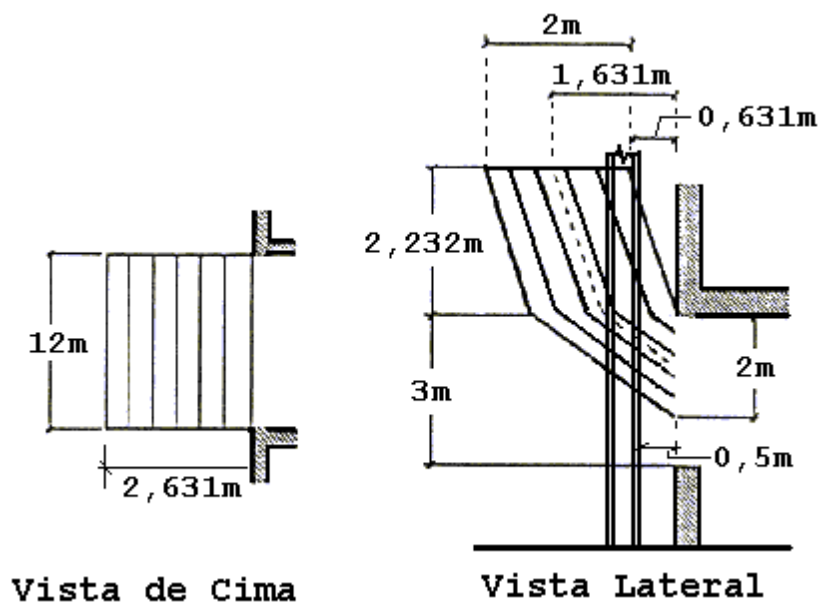


Figura 3.2: Dimensões da chama para ventilação natural

#### 3.8.1.4 Sob Condições de Ventilação Forçada

##### 3.8.1.4.1 Taxa de Queima

$$R = \frac{L}{\tau_F} = \frac{24000}{1200} = 20 \text{kg / s}$$

##### 3.8.1.4.2 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

$$T_f = 1200 \left( 1 - e^{-0,04 \times 113,776} \right) + 20 = 1207,333^\circ \text{C}$$

##### 3.8.1.4.3 Altura da Chama

Considera-se a velocidade do vento,  $u = 6 \text{m/s}$ .

$$z = 23,9 \left( \frac{1}{6} \right)^{0,43} \left( \frac{20}{36^{1/2}} \right) - 3 = 33,870 \text{m}$$

##### 3.8.1.4.4 Projeção Horizontal da Chama

$$\chi = 0,61 \left[ \frac{6^2}{3} \right]^{0,22} (33,870 + 3) = 38,853 \text{m}$$

##### 3.8.1.4.5 Largura da Chama

$$\omega_z \cong 12 + 0,4 \times 38,853 = 27,541 \text{m}$$

##### 3.8.1.4.6 Comprimento da Chama ao longo do Eixo

$$x = \left( 33,870^2 + 38,853^2 \right)^{1/2} = 51,543 \text{m}$$

#### 3.8.1.4.7 Temperatura da Chama na Janela

$$T_o = 518 / \left[ 1 - \left( 0,019 \times 51,543 \times 36^{1/2} / 20 \right) \right] + 20 = 753,498^\circ \text{C}$$

#### 3.8.1.4.8 Emissividade na Janela

$$\varepsilon_f = 1$$

#### 3.8.1.4.9 Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo

Para a determinação deste parâmetro, primeiramente deve-se saber se o pilar encontra-se ou não envolvido em chamas, a partir das dimensões da chama determinadas anteriormente. A figura 3.3 mostra tais dimensões para a situação de ventilação forçada.

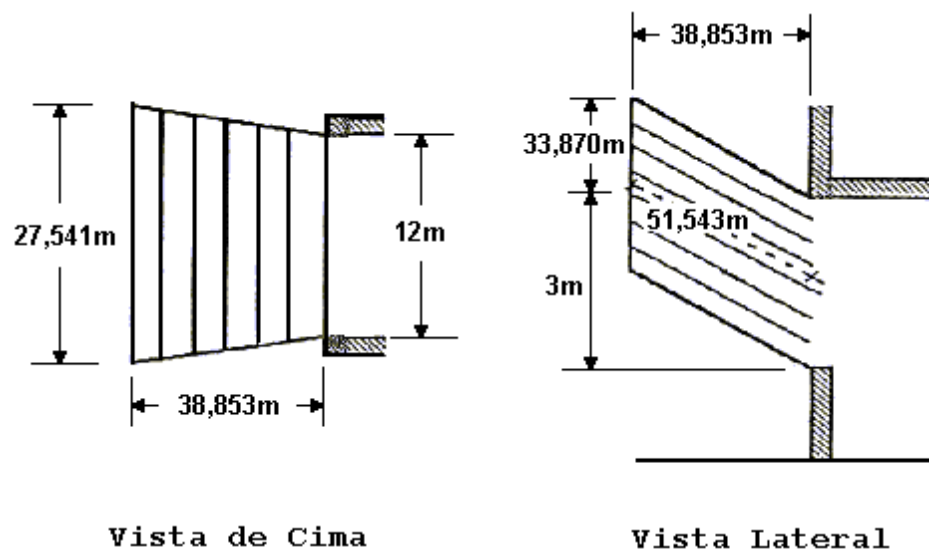


Figura 3.3: Dimensões da chama para ventilação forçada

O pilar encontra-se envolvido em chamas, conforme a figura 3.4.

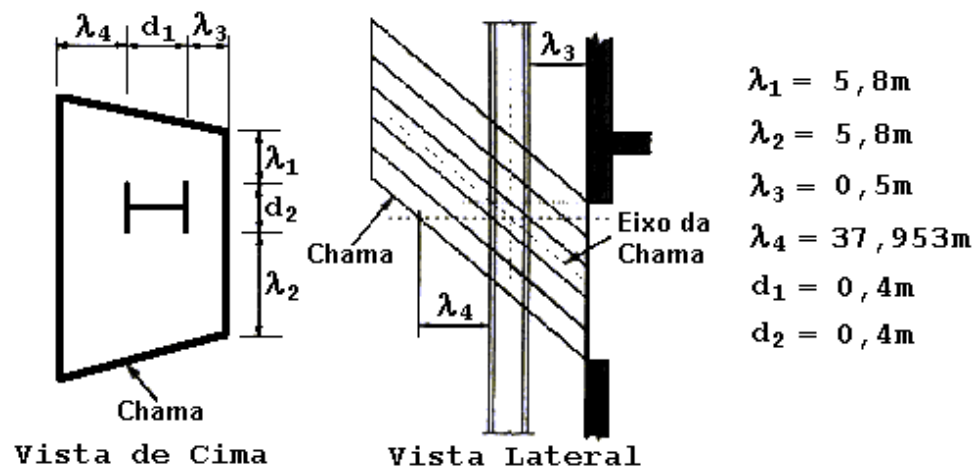


Figura 3.4: Pilar envolvido em chamas

$$l = (0,5 + 0,5 \times 0,4) \times 51,543 / 38,853 = 0,929$$

$$\text{sen do } l \leq 0,5 \times 3 \times 51,543 / 33,870 \Rightarrow l \leq 2,283 \quad \text{OK}$$

$$T_z = \left[ 1 - 0,019 \frac{0,929 \times 36^{1/2}}{20} \right] (753,498 - 20) + 20 = 749,614^\circ\text{C}$$

### 3.8.1.5 Fator de Configuração

#### 3.8.1.5.1 Janela como Superfície Irradiante

A figura 3.5 ilustra a condição da janela se apresentar como superfície irradiante.

Face 1:

$$a = h'/S' = 3/0,7 = 4,286$$

$$b = \omega'/S' = 5,8/0,7 = 8,286$$

$$\phi_{f,1} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \text{tag}^{-1}(4,286) - \frac{1}{(1 + 8,286^2)^{0,5}} \text{tag}^{-1} \left[ \frac{4,286}{(1 + 8,286^2)^{0,5}} \right] \right\} = 0,204$$

Face 2:

Idem face 1  $\Rightarrow \phi_{f,2} = 0,204$

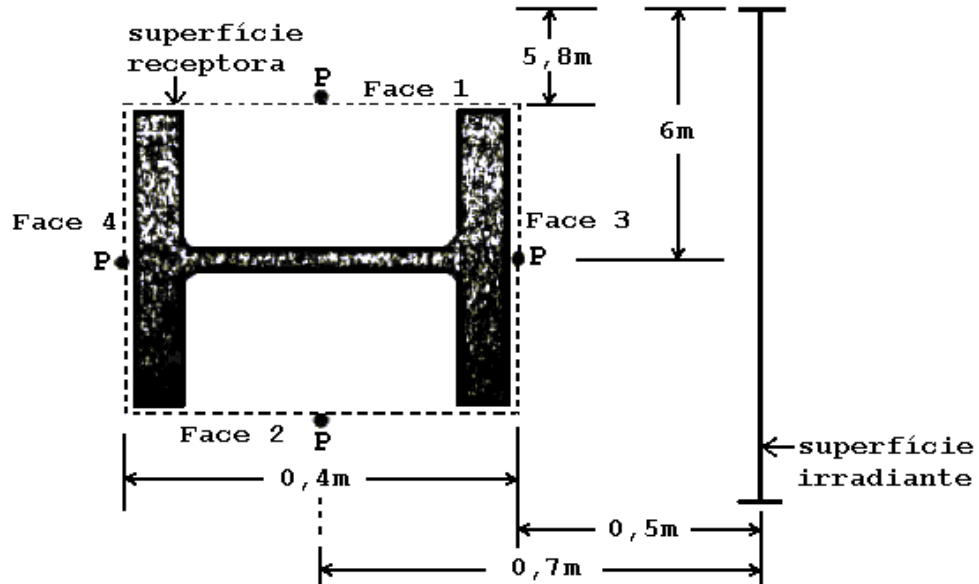


Figura 3.5: Janela como superfície irradiante

Face 3:

Para a face 3 do pilar, calcula-se o componente do fator de configuração do seu lado direito e também o componente do seu lado esquerdo.

• Lado direito:

$$a = h'/S' = 3/0,5 = 6$$

$$b = \omega_R'/S' = 6/0,5 = 12$$

$$\phi_{f,3R} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{6}{(1+6^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{12}{(1+6^2)^{0,5}} \right] + \frac{12}{(1+12^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{6}{(1+12^2)^{0,5}} \right] \right\}$$

$$\phi_{f,3R} = 0,246$$

• Lado esquerdo:

Idem lado direito, pois o pilar encontra-se simetricamente centrado em frente à abertura.

$$\phi_{f,3L} = 0,246$$



Logo, o fator de configuração total para a face 3 do pilar fica:

$$\phi_{f,3} = \phi_{f,3R} + \phi_{f,3L} = 0,246 + 0,246 = 0,492$$

Face 4:

$\phi_{f,4} = 0$ , pois a superfície irradiante não é vista pela face 4 da superfície receptora.

### 3.8.1.5.1.1 Fator de Configuração Total

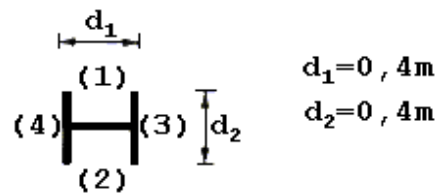


Figura 3.6: Dimensões do pilar

Ao considerar o pilar totalmente sem proteção, tem-se:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1$$

$$\phi_f = \frac{(0,204 + 0,204)0,4 + (0,492 + 0)0,4}{(1 + 1)0,4 + (1 + 1)0,4} = 0,225$$

### 3.8.1.5.2 Chama como Superfície Irradiante

Devido ao pilar estar envolvido em chamas, tem-se  $\phi_z = 0$

### 3.8.1.6 Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

#### 3.8.1.6.1 Ventilação Natural

$$d = (0,4 + 0,4) / 2 = 0,4\text{m}$$

$$\alpha_z = 0,026 \left[ \frac{3,136}{36} \right]^{0,6} \left[ \frac{1}{0,4} \right]^{0,4} = 0,009 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

### 3.8.1.6.2 Ventilação Forçada

$$\alpha_z = 0,0098 \left[ \frac{1}{0,4} \right]^{0,4} \left[ \frac{20}{36} + \frac{6}{1,6} \right]^{0,6} = 0,034 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

### 3.8.1.7 Absortividade da Chama

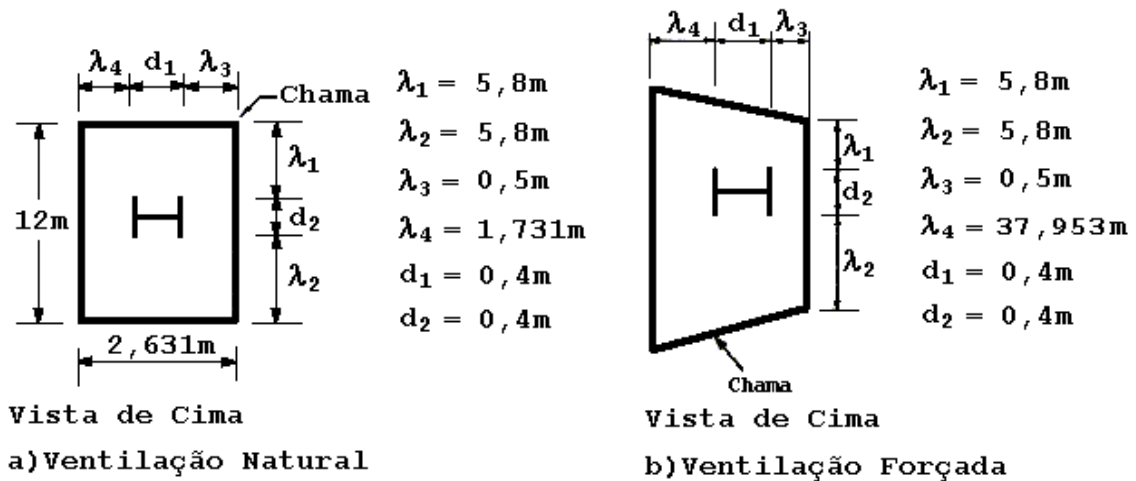


Figura 3.7: Pilar envolvido em chamas

$$\varepsilon_{z,1} = 1 - e^{-0,3 \times 5,8} = 0,824$$

$$\varepsilon_{z,2} = 1 - e^{-0,3 \times 5,8} = 0,824$$

$$\varepsilon_{z,3} = 1 - e^{-0,3 \times 0,5} = 0,139$$

$$a_z = \frac{0,824 + 0,824 + 0,139}{3} = 0,596$$

### 3.8.1.8 Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas

#### 3.8.1.8.1 Ventilação Natural

$$\sigma = 56,7 \times 10^{-12} \text{ kW / (m}^2 \cdot \text{C}^4)$$

$$I_f = 0,225 \times 1(1 - 0,596) \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1178,059 + 273,15)^4 = 22,860 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.1.8.2 Ventilação Forçada

$$I_f = 0,225 \times 1(1 - 0,596) \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1207,333 + 273,15)^4 = 24,761 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

### 3.8.1.9 Fluxo de Calor por Radiação das Chamas

#### 3.8.1.9.1 Ventilação Natural

$$\varepsilon_{z,4} = 1 - e^{-0,3 \times 1,731} = 0,405$$

$$I_{z,1} = 1 \times 0,824 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (742,989 + 273,15)^4 = 49,811 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,2} = 1 \times 0,824 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (742,989 + 273,15)^4 = 49,811 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,3} = 1 \times 0,139 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (875,583 + 273,15)^4 = 13,724 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,4} = 1 \times 0,405 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (742,989 + 273,15)^4 = 24,486 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_z = \frac{(49,811 + 49,811) \times 0,4 + (13,724 + 24,486) \times 0,4}{2(0,4 + 0,4)} = 34,458 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.1.9.2 Ventilação Forçada

$$\varepsilon_{z,4} = 1 - e^{-0,3 \times 37,953} = 1$$

$$I_{z,1} = 1 \times 0,824 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (749,614 + 273,15)^4 = 51,122 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,2} = 1 \times 0,824 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (749,614 + 273,15)^4 = 51,122 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,3} = 1 \times 0,139 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (753,498 + 273,15)^4 = 8,756 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,4} = 1 \times 1 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (749,614 + 273,15)^4 = 62,042 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_z = \frac{(51,122 + 51,122) \times 0,4 + (8,756 + 62,042) \times 0,4}{2(0,4 + 0,4)} = 43,261 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

### 3.8.1.10 Temperatura Média do Aço

#### 3.8.1.10.1 Ventilação Natural

$$56,7 \times 10^{-12}(T_s + 273,15)^4 + 0,009(T_s + 273,15) = 34,458 + 22,860 + 0,009 \times (742,989 + 273,15)$$

$$T_s = 730,070^\circ \text{C}$$

#### 3.8.1.10.2 Ventilação Forçada

$$56,7 \times 10^{-12}(T_s + 273,15)^4 + 0,034(T_s + 273,15) = 43,261 + 24,761 + 0,034 \times (749,614 + 273,15) \Rightarrow T_s = 770,655^\circ \text{C}$$

A partir dos valores encontrados nos itens 3.8.1.10.1 e 3.8.1.10.2 dimensionam-se as estruturas de aço conforme a NBR 14323 (1).

3.8.2 AQUECIMENTO DE PILAR EXTERNO SENDO A ABERTURA 3 x 1,20m E A DISTÂNCIA DO PILAR AO COMPARTIMENTO IGUAL A 0,5m

Para este exemplo, mantém-se o perfil soldado série CS-400x128.

3.8.2.1 Dimensões do Compartimento

Considera-se o mesmo compartimento simples de incêndio do exemplo anterior, porém a janela passa a ter 3m de largura por 1,20m de altura, conforme a figura 3.8.

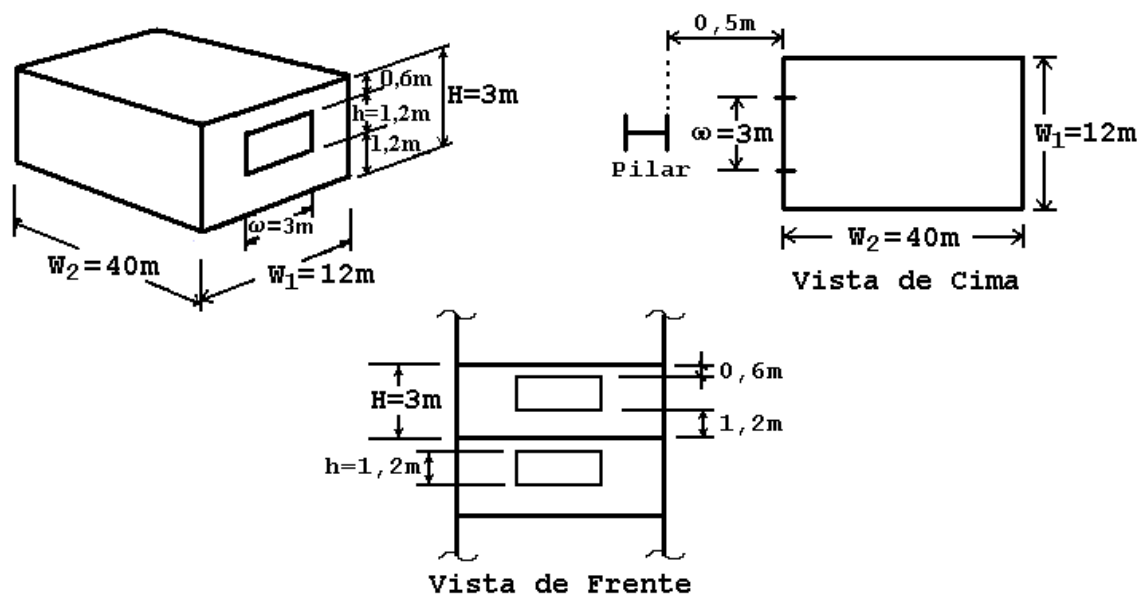


Figura 3.8: Dimensões do compartimento

$$A_F = 12 \times 40 = 480\text{m}^2$$

$$A_{\omega} = 3 \times 1,2 = 3,6\text{m}^2$$

$$A_T = 2 \times 480 + 2 \times 3(12 + 40) - 3,6 = 1268,4\text{m}^2$$

$$D / W = 40 / 12 = 10 / 3$$

### 3.8.2.2. Carga Total de Incêndio

$$L = 50 \times 480 = 24000\text{kg}$$

### 3.8.2.3 Sob Condições de Ventilação Natural

#### 3.8.2.3.1 *Condição de Queima-Livre*

$$R_1 = \frac{L}{\tau_F} = \frac{24000}{1200} = 20\text{kg} / \text{s}$$

#### 3.8.2.3.2 *Condição de Ventilação Controlada*

$$\eta = \frac{1268,4}{3,6 \times 1,2^{1/2}} = 321,635\text{m}^{-1/2}$$

$$R_2 = \left[ 0,18 \left( 1 - e^{-0,036 \times 321,635} \right) \times 3,6 \left( 1,2 \times \frac{3}{10} \right)^{1/2} \right] = 0,388 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

#### 3.8.2.3.3 *Taxa de Queima*

$$R_2 < R_1 \Rightarrow R = R_2 = 0,388 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \Rightarrow \text{Condição de ventilação controlada}$$

#### 3.8.2.3.4 *Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento*

$$\Psi = \frac{24000}{(3,6 \times 1268,4)^{1/2}} = 355,166 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$T_f = 6000 \frac{(1 - e^{-0,1 \times 321,635})}{321,635^{1/2}} (1 - e^{-0,05 \times 355,166}) + 20 = 354,557^\circ \text{C}$$

#### 3.8.2.3.5 *Altura da Chama*

Considera-se a ausência de toldo ou sacada acima da janela.

$$z = 12,8 \left[ \frac{0,388}{3} \right]^{2/3} - 1,2 = 2,078 \text{m}$$

#### 3.8.2.3.6 *Projeção Horizontal da Chama*

Há parede acima da janela.

Tem-se:  $h \leq 1,25\omega \Rightarrow 1,2 < 3,750$  OK

Portanto:  $\chi = 1,2 / 3 = 0,400 \text{m}$

#### 3.8.2.3.7 *Largura da Chama*

Largura da chama = 3m

#### 3.8.2.3.8 *Profundidade da Chama*

Profundidade da chama =  $2 \times 1,2 / 3 = 0,800 \text{m}$

#### 3.8.2.3.9 *Comprimento da Chama ao longo do Eixo*

$$X = 2,078 + 1,2 / 2 = 2,678 \text{m}$$

#### 3.8.2.3.10 *Temperatura da Chama na Janela*

$$T_o = 518 / [1 - 0,027(2,678 \times 3 / 0,388)] + 20 = 1194,782^\circ \text{C}$$

#### 3.8.2.3.11 Emissividade na Janela

$$\varepsilon_f = 1$$

#### 3.8.2.3.12 Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo

$$\ell = 1,2 / 2 = 0,600\text{m}$$

$$T_z = (1194,782 - 20) \left[ 1 - 0,027 \left( 0,600 \times \frac{3}{0,388} \right) \right] + 20 = 1047,631^\circ\text{C}$$

#### 3.8.2.4 Sob Condições de Ventilação Forçada

##### 3.8.2.4.1 Taxa de Queima

$$R = \frac{L}{\tau_F} = \frac{24000}{1200} = 20\text{kg / s}$$

##### 3.8.2.4.2 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

$$T_f = 1200 \left( 1 - e^{-0,04 \times 355,166} \right) + 20 = 1219,999^\circ\text{C}$$

##### 3.8.2.4.3 Altura da Chama

Considera-se a velocidade do vento,  $u = 6\text{m/s}$ .

$$z = 23,9 \left( \frac{1}{6} \right)^{0,43} \left( \frac{20}{3,6^{1/2}} \right) - 1,2 = 115,393\text{m}$$



#### 3.8.2.4.4 *Projeção Horizontal da Chama*

$$\chi = 0,61 \left[ \frac{6^2}{1,2} \right]^{0,22} (115,393 + 1,2) = 150,303\text{m}$$

#### 3.8.2.4.5 *Largura da Chama*

$$\omega_z \cong 3 + 0,4 \times 150,303 = 63,121\text{m}$$

#### 3.8.2.4.6 *Comprimento da Chama ao longo do seu Eixo*

$$x = \left( 115,393^2 + 150,303^2 \right)^{1/2} = 189,490\text{m}$$

#### 3.8.2.4.7 *Temperatura da Chama na Janela*

$$T_o = 518 / \left[ 1 - \left( 0,019 \times 189,490 \times 3,6^{1/2} / 20 \right) \right] + 20 = 806,702^\circ\text{C}$$

#### 3.8.2.4.8 *Emissividade na Janela*

$$\varepsilon_f = 1$$

#### 3.8.2.4.9 *Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo*

A partir das dimensões da chama determinadas anteriormente, pode-se saber se o pilar encontra-se ou não envolvido em chamas.

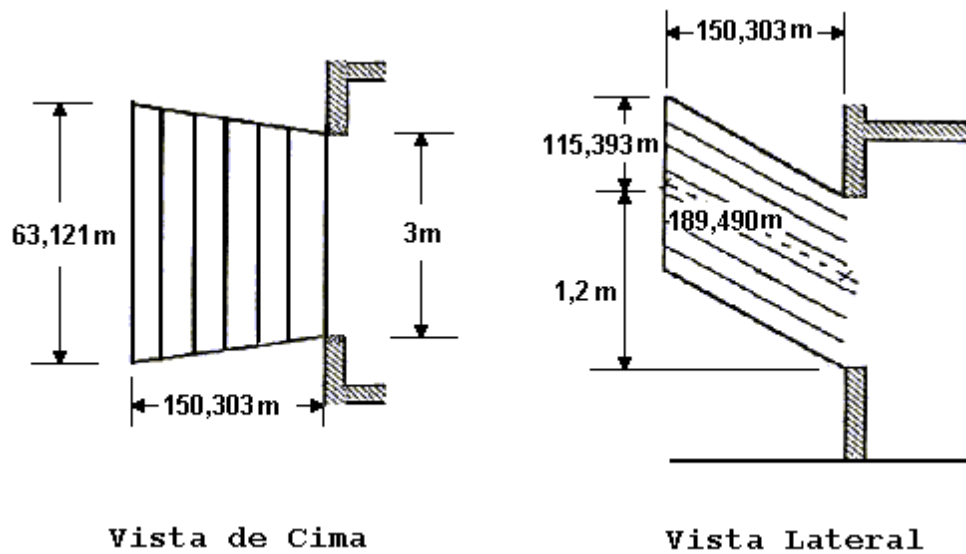


Figura 3.9: Dimensões da chama para ventilação forçada

O pilar encontra-se envolvido em chamas, conforme a figura 3.10.

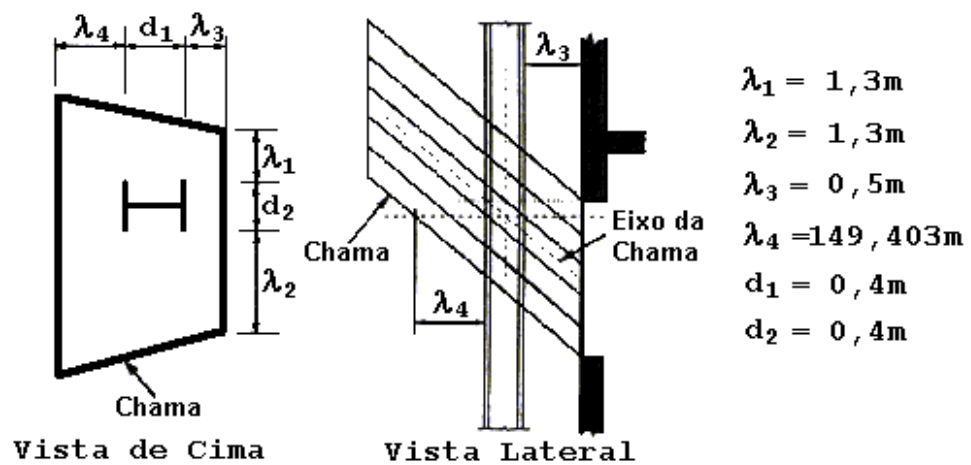


Figura 3.10: Pilar envolvido em chamas

$$l = (0,5 + 0,5 \times 0,4) \times 189,490 / 150,303 = 0,883$$

$$\text{sen do } l \leq 0,5 \times 1,2 \times 189,490 / 115,393 \Rightarrow l \leq 0,985 \quad \text{OK}$$

$$T_z = \left[ 1 - 0,019 \frac{0,883 \times 3,6^{1/2}}{20} \right] (806,702 - 20) + 20 = 805,450^\circ \text{C}$$

### 3.8.2.5 Fator de Configuração

#### 3.8.2.5.1 Janela como Superfície Irradiante

A figura 3.11 ilustra a condição da janela se apresentar como superfície irradiante.

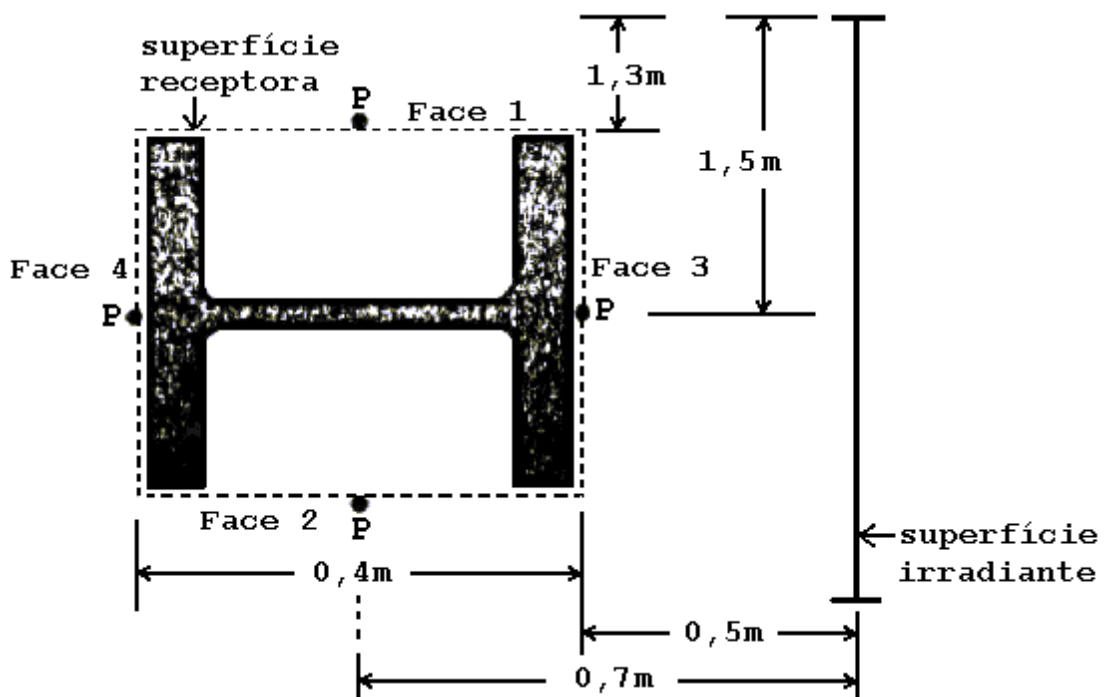


Figura 3.11: Janela como superfície irradiante

Face 1:

$$a = h' / S' = 1,2 / 0,7 = 1,714$$

$$b = \omega' / S' = 1,3 / 0,7 = 1,857$$

$$\phi_{f,1} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \text{tag}^{-1}(1,714) - \frac{1}{(1 + 1,857^2)^{0,5}} \text{tag}^{-1} \left[ \frac{1,714}{(1 + 1,857^2)^{0,5}} \right] \right\} = 0,114$$

Face 2:

Idem face 1  $\Rightarrow \phi_{f,2} = 0,114$

Face 3:

• Lado direito:

$$a = h'/S' = 1,2/0,5 = 2,4$$

$$b = \omega_R'/S' = 1,5/0,5 = 3$$

$$\phi_{f,3R} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{2,4}{(1 + 2,4^2)^{0,5}} \text{tag}^{-1} \left[ \frac{3}{(1 + 2,4^2)^{0,5}} \right] + \frac{3}{(1 + 3^2)^{0,5}} \text{tag}^{-1} \left[ \frac{2,4}{(1 + 3^2)^{0,5}} \right] \right\}$$

$$\phi_{f,3R} = 0,224$$

• Lado esquerdo:

Idem lado direito, pois o pilar encontra-se simetricamente centrado à frente da abertura.

$$\phi_{f,3L} = 0,224$$

Logo, o fator de configuração total para a face 3 do pilar fica:

$$\phi_{f,3} = \phi_{f,3R} + \phi_{f,3L} = 0,224 + 0,224 = 0,448$$

Face 4:

$\phi_{f,4} = 0$ , pois a superfície irradiante não é vista pela face 4 da superfície receptora.

#### 3.8.2.5.1.1 Fator de Configuração Total

Como para este exemplo usa-se o mesmo pilar utilizado no exemplo anterior, tem-se as suas dimensões ilustradas na figura 3.6.

Ao considerar o pilar totalmente sem proteção, tem-se:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1$$

$$\phi_f = \frac{(0,114 + 0,114)0,4 + (0,448 + 0)0,4}{(1 + 1)0,4 + (1 + 1)0,4} = 0,169$$

#### 3.8.2.5.2 Chama como Superfície Irradiante

Para este exemplo, considera-se  $\phi_z = 0$ , uma vez que o pilar encontra-se envolvido em chamas, conforme a figura 3.12.

#### 3.8.2.6 Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

##### 3.8.2.6.1 Ventilação Natural

$$d = (0,4 + 0,4) / 2 = 0,4\text{m}$$

$$\alpha_z = 0,026 \left[ \frac{0,388}{3,6} \right]^{0,6} \left[ \frac{1}{0,4} \right]^{0,4} = 0,009 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

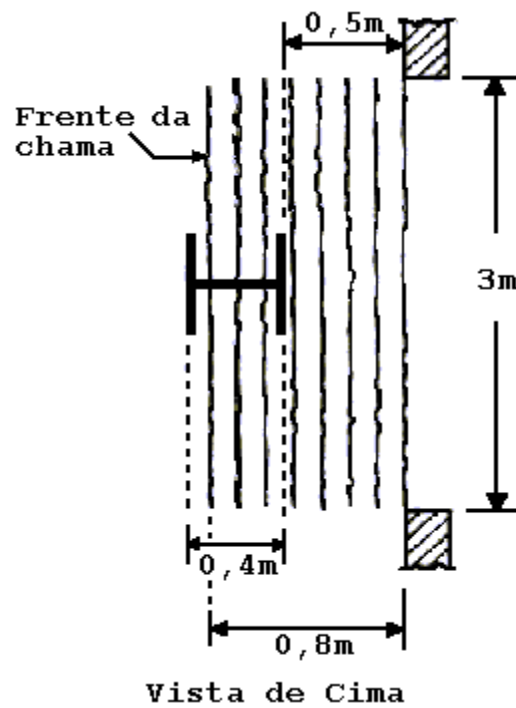


Figura 3.12: Chama como superfície irradiante

### 3.8.2.6.2 Ventilação Forçada

$$\alpha_z = 0,0098 \left[ \frac{1}{0,4} \right]^{0,4} \left[ \frac{20}{3,6} + \frac{6}{1,6} \right]^{0,6} = 0,054 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

### 3.8.2.7 Absortividade da Chama

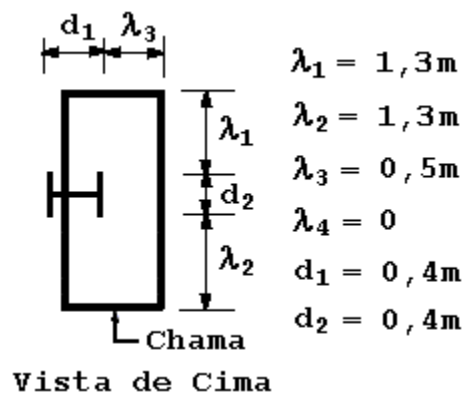


Figura 3.13: Pilar envolvido em chamas, para ventilação natural

$$\varepsilon_{z,1} = 1 - e^{-0,3 \times 1,3} = 0,323$$

$$\varepsilon_{z,2} = 1 - e^{-0,3 \times 1,3} = 0,323$$

$$\varepsilon_{z,3} = 1 - e^{-0,3 \times 0,5} = 0,139$$

$$a_z = \frac{0,323 + 0,323 + 0,139}{3} = 0,262$$

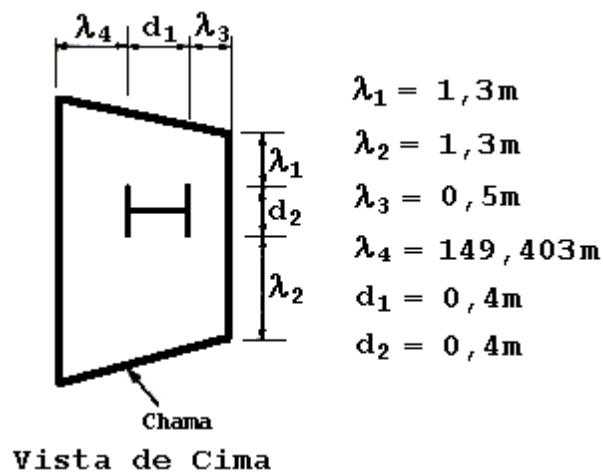


Figura 3.14: Pilar envolvido em chamas, para ventilação forçada

### 3.8.2.8 Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas

#### 3.8.2.8.1 Ventilação Natural

$$\sigma = 56,7 \times 10^{-12} \text{ kW } / (\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$$

$$I_f = 0,169 \times 1(1 - 0,262) \times 56,7 \times 10^{-12} \times (354,557 + 273,15)^4 = 1,098 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

### 3.8.2.8.2 Ventilação Forçada

$$I_f = 0,169 \times 1(1 - 0,262) \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1219,999 + 273,15)^4 = 35,151 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

### 3.8.2.9 Fluxo de Calor por Radiação das Chamas

#### 3.8.2.9.1 Ventilação Natural

$$\epsilon_{z,4} = 1 - e^{-0,3 \times 0} = 0$$

$$I_{z,1} = 1 \times 0,323 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1047,631 + 273,15)^4 = 55,733 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,2} = 1 \times 0,323 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1047,631 + 273,15)^4 = 55,733 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,3} = 1 \times 0,139 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1194,782 + 273,15)^4 = 36,595 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,4} = 1 \times 0 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1047,631 + 273,15)^4 = 0$$

$$I_z = \frac{(55,733 + 55,733) \times 0,4 + (36,595 + 0) \times 0,4}{2(0,4 + 0,4)} = 37,015 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.2.9.2 Ventilação Forçada

$$\epsilon_{z,4} = 1 - e^{-0,3 \times 149,403} = 1$$

$$I_{z,1} = 1 \times 0,323 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (805,450 + 273,15)^4 = 24,787 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,2} = 1 \times 0,323 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (805,450 + 273,15)^4 = 24,787 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,3} = 1 \times 0,139 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (806,702 + 273,15)^4 = 10,717 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,4} = 1 \times 1 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (805,450 + 273,15)^4 = 76,741 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_z = \frac{(24,787 + 24,787) \times 0,4 + (10,717 + 76,741) \times 0,4}{2(0,4 + 0,4)} = 34,258 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$



### 3.8.2.10 Temperatura Média do Aço

#### 3.8.2.10.1 Ventilação Natural

$$56,7 \times 10^{-12}(T_s + 273,15)^4 + 0,009(T_s + 273,15) = 37,381 + 1,098 + \\ + 0,009 \times (1047,631 + 273,15)$$

$$T_s = 654,657^\circ \text{C}$$

#### 3.8.2.10.2 Ventilação Forçada

$$56,7 \times 10^{-12}(T_s + 273,15)^4 + 0,054(T_s + 273,15) = 34,258 + 35,151 + \\ + 0,054 \times (805,450 + 273,15)$$

$$T_s = 783,228^\circ \text{C}$$

A partir dos valores encontrados nos itens 3.8.2.10.1 e 3.8.2.10.2 dimensionam-se as estruturas de aço conforme a NBR 14323 (1).

3.8.3 AQUECIMENTO DE PILAR EXTERNO SENDO A ABERTURA  
3 x 1,20m E A DISTÂNCIA DO PILAR AO COMPARTIMENTO  
IGUAL A 0,9m

Para este exemplo, será utilizado o perfil soldado série CS-400x128.

### 3.8.3.1 Dimensões do Compartimento

Considera-se o mesmo compartimento simples de incêndio, o qual foi utilizado no exemplo 3.8.2, porém aqui o pilar encontra-se a uma distância de 0,9m da abertura.

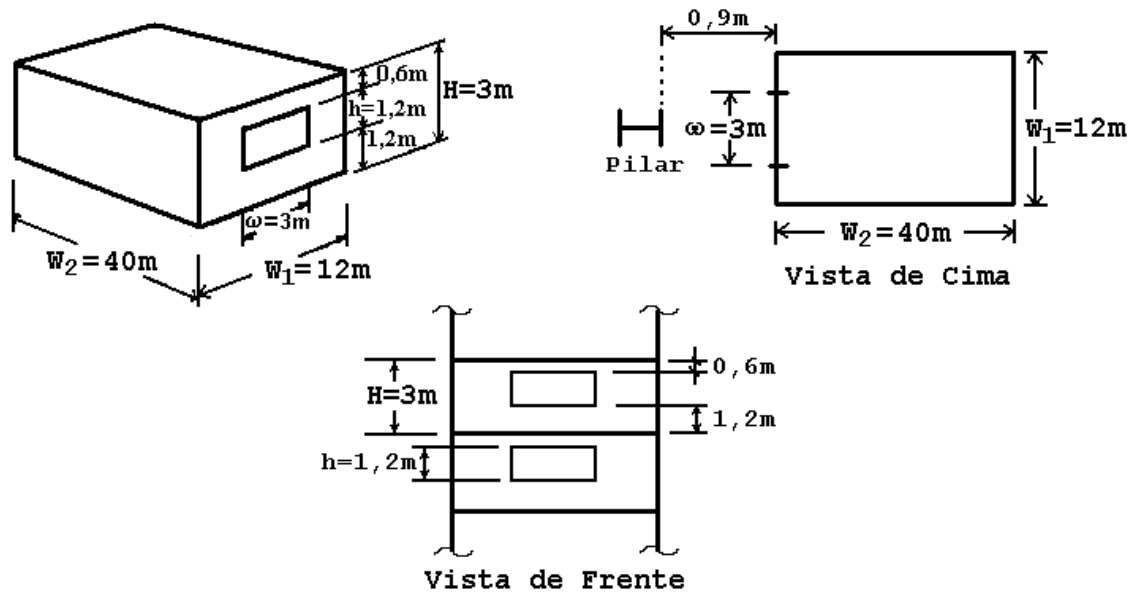


Figura 3.15: Dimensões do compartimento

$$A_F = 12 \times 40 = 480\text{m}^2$$

$$A_{\omega} = 3 \times 1,2 = 3,6\text{m}^2$$

$$A_T = 2 \times 480 + 2 \times 3(12 + 40) - 3,6 = 1268,4\text{m}^2$$

$$D / W = 40 / 12 = 10 / 3$$

### 3.8.3.2. Carga Total de Incêndio

$$L = 50 \times 480 = 24000\text{kg}$$

### 3.8.3.3 Sob Condições de Ventilação Natural

#### 3.8.3.3.1 Condição de Queima-Livre

$$R_1 = \frac{L}{\tau_F} = \frac{24000}{1200} = 20 \text{ kg / s}$$

#### 3.8.3.3.2 Condição de Ventilação Controlada

$$\eta = \frac{1268,4}{3,6 \times 1,2^{1/2}} = 321,635 \text{ m}^{-1/2}$$

$$R_2 = \left[ 0,18 \left( 1 - e^{-0,036 \times 321,635} \right) \times 3,6 \left( 1,2 \times \frac{3}{10} \right)^{1/2} \right] = 0,388 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

#### 3.8.3.3.3 Taxa de Queima

$$R_2 < R_1 \Rightarrow R = R_2 = 0,388 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \Rightarrow \text{Condição de ventilação controlada}$$

#### 3.8.3.3.4 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

$$\Psi = \frac{24000}{(3,6 \times 1268,4)^{1/2}} = 355,166 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$T_f = 6000 \frac{(1 - e^{-0,1 \times 321,635})}{321,635^{1/2}} (1 - e^{-0,05 \times 355,166}) + 20 = 354,557^\circ \text{C}$$

#### 3.8.3.3.5 Altura da Chama

Considera-se a ausência de toldo ou sacada acima da janela.

$$z = 12,8 \left[ \frac{0,388}{3} \right]^{2/3} - 1,2 = 2,078\text{m}$$

#### 3.8.3.3.6 *Projeção Horizontal da Chama*

Há parede acima da janela.

Tem-se:  $h \leq 1,25\omega \Rightarrow 1,2 < 3,750$  OK

Portanto:  $\chi = 1,2 / 3 = 0,400\text{m}$

#### 3.8.3.3.7 *Largura da Chama*

Largura da chama = 3m

#### 3.8.3.3.8 *Profundidade da Chama*

Profundidade da chama =  $2 \times 1,2 / 3 = 0,800\text{m}$

#### 3.8.3.3.9 *Comprimento da Chama ao longo do Eixo*

$X = 2,078 + 1,2 / 2 = 2,678\text{m}$

#### 3.8.3.3.10 *Temperatura da Chama na Janela*

$T_o = 518 / [1 - 0,027(2,678 \times 3 / 0,388)] + 20 = 1194,782^\circ\text{C}$

#### 3.8.3.3.11 *Emissividade na Janela*

$\epsilon_f = 1$

### 3.8.3.3.12 Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo

$$\ell = 1,2 / 2 = 0,600\text{m}$$

$$T_z = (1194,782 - 20) \left[ 1 - 0,027 \left( 0,600 \times \frac{3}{0,388} \right) \right] + 20 = 1047,631^\circ\text{C}$$

### 3.8.3.4 Sob Condições de Ventilação Forçada

#### 3.8.3.4.1 Taxa de Queima

$$R = \frac{L}{\tau_F} = \frac{24000}{1200} = 20\text{kg / s}$$

#### 3.8.3.4.2 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

$$T_f = 1200 \left( 1 - e^{-0,04 \times 355,166} \right) + 20 = 1219,999^\circ\text{C}$$

#### 3.8.3.4.3 Altura da Chama

Considera-se a velocidade do vento,  $u = 6\text{m/s}$ .

$$z = 23,9 \left( \frac{1}{6} \right)^{0,43} \left( \frac{20}{3,6^{1/2}} \right) - 1,2 = 115,393\text{m}$$

#### 3.8.3.4.4 Projeção Horizontal da Chama

$$\chi = 0,61 \left[ \frac{6^2}{1,2} \right]^{0,22} (115,393 + 1,2) = 150,303\text{m}$$

3.8.3.4.5 *Largura da Chama*

$$\omega_z \cong 3 + 0,4 \times 150,303 = 63,121\text{m}$$

3.8.3.4.6 *Comprimento da Chama ao longo do seu Eixo*

$$x = \left(115,393^2 + 150,303^2\right)^{1/2} = 189,490\text{m}$$

3.8.3.4.7 *Temperatura da Chama na Janela*

$$T_o = 518 / \left[1 - \left(0,019 \times 189,490 \times 3,6^{1/2} / 20\right)\right] + 20 = 806,702^\circ\text{C}$$

3.8.3.4.8 *Emissividade na Janela*

$$\epsilon_f = 1$$

3.8.3.4.9 *Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo*

A partir das figuras 3.9 e 3.16, sabe-se que o pilar se encontra envolvido em chamas.

$$l = (0,9 + 0,5 \times 0,4) \times 189,490 / 150,303 = 1,387$$

$$\text{sen do } l \leq 0,5 \times 1,2 \times 189,490 / 115,393 \Rightarrow l \leq 0,985$$

logo, toma - se  $l = 0,985$

$$T_z = \left[1 - 0,019 \frac{0,985 \times 3,6^{1/2}}{20}\right] (806,702 - 20) + 20 = 805,305^\circ\text{C}$$

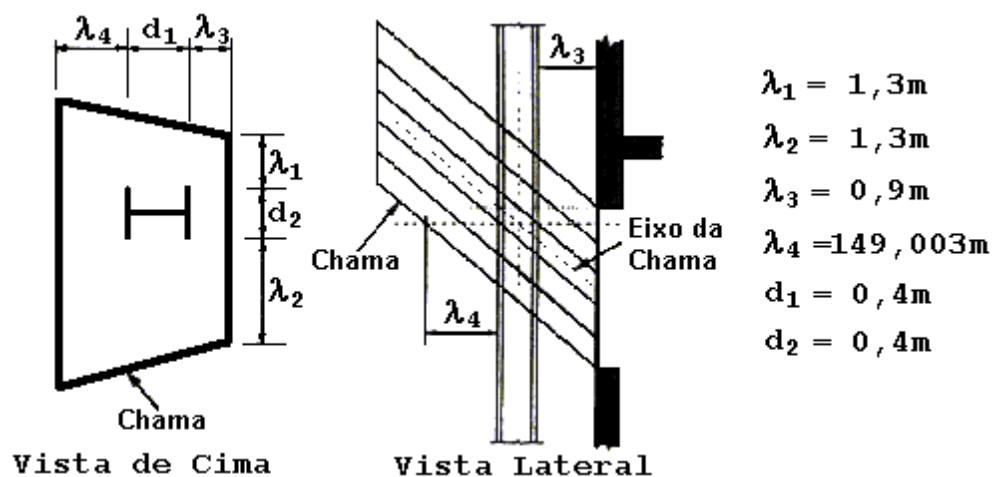


Figura 3.16: Pilar envolvido em chamas

### 3.8.3.5 Fator de Configuração

#### 3.8.3.5.1 Janela como Superfície Irradiante

A figura 3.17 ilustra a condição da janela se apresentar como superfície irradiante.

Face 1:

$$a = h'/S' = 1,2/1,1 = 1,091$$

$$b = \omega'/S' = 1,3/1,1 = 1,182$$

$$\phi_{f,1} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \tan^{-1}(1,091) - \frac{1}{(1 + 1,182^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left[ \frac{1,091}{(1 + 1,182^2)^{0,5}} \right] \right\} = 0,069$$

Face 2:

$$\text{Idem face 1} \Rightarrow \phi_{f,2} = 0,069$$

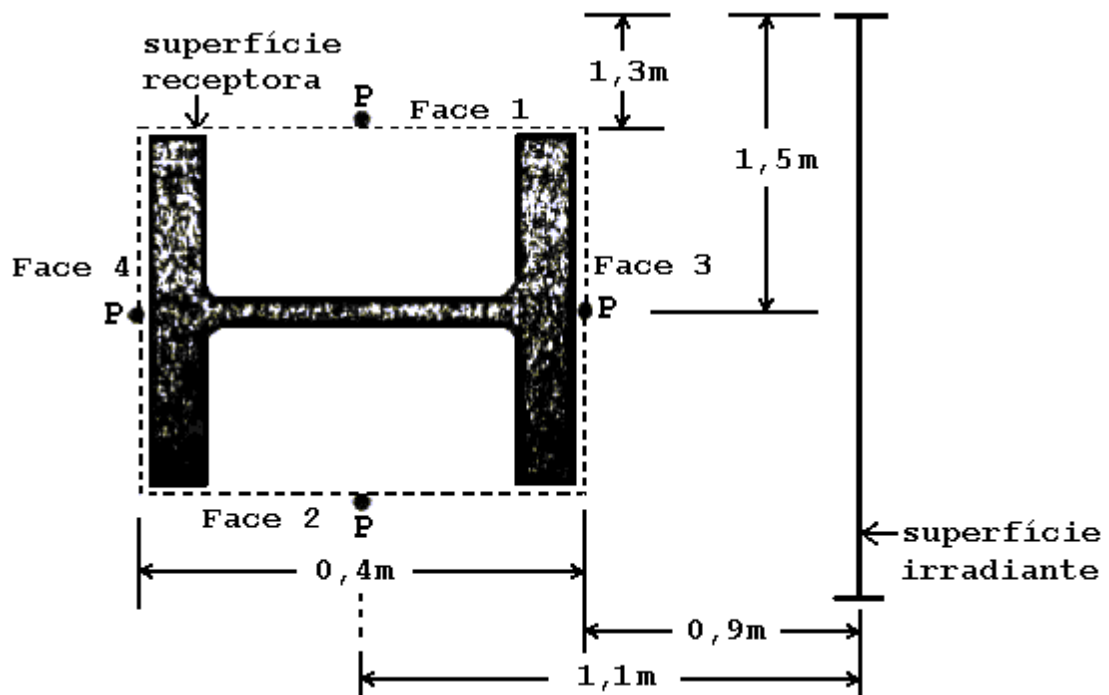


Figura 3.17: Janela como superfície irradiante

Face 3:

- Lado direito:

$$a = h'/S' = 1,2/0,9 = 1,333$$

$$b = \omega_R'/S' = 1,5/0,9 = 1,667$$

$$\phi_{f,3R} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{1,333}{(1 + 1,333^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{1,667}{(1 + 1,333^2)^{0,5}} \right] + \frac{1,667}{(1 + 1,667^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{1,333}{(1 + 1,667^2)^{0,5}} \right] \right\} = 0,182$$

- Lado esquerdo:

Idem lado direito, pois o pilar encontra-se simetricamente centrado à frente da abertura.

$$\phi_{f,3L} = 0,182$$

Logo, o fator de configuração total para a face 3 do pilar fica:



$$\phi_{f,3} = \phi_{f,3R} + \phi_{f,3L} = 0,182 + 0,182 = 0,364$$

Face 4:

$\phi_{f,4} = 0$ , pois a superfície irradiante não é vista pela face 4 da superfície receptora.

### 3.8.3.5.1.1 Fator de Configuração Total

Como o pilar utilizado é o mesmo dos exemplos anteriores, tem-se  $d_1 = d_2 = 0,4$ .

Ao considerar o pilar totalmente sem proteção, tem-se:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1$$

$$\phi_f = \frac{(0,068 + 0,068)0,4 + (0,364 + 0)0,4}{(1 + 1)0,4 + (1 + 1)0,4} = 0,125$$

### 3.8.3.5.2 Chama como Superfície Irradiante

#### 3.8.3.5.2.1 Ventilação Natural

Como, para esta situação, o pilar não se encontra envolvido em chamas, conforme a figura 3.18, deve-se calcular o valor de  $\phi_z$ .

Para esta situação considera-se  $h'$  e  $\omega'$  relativos à chama.

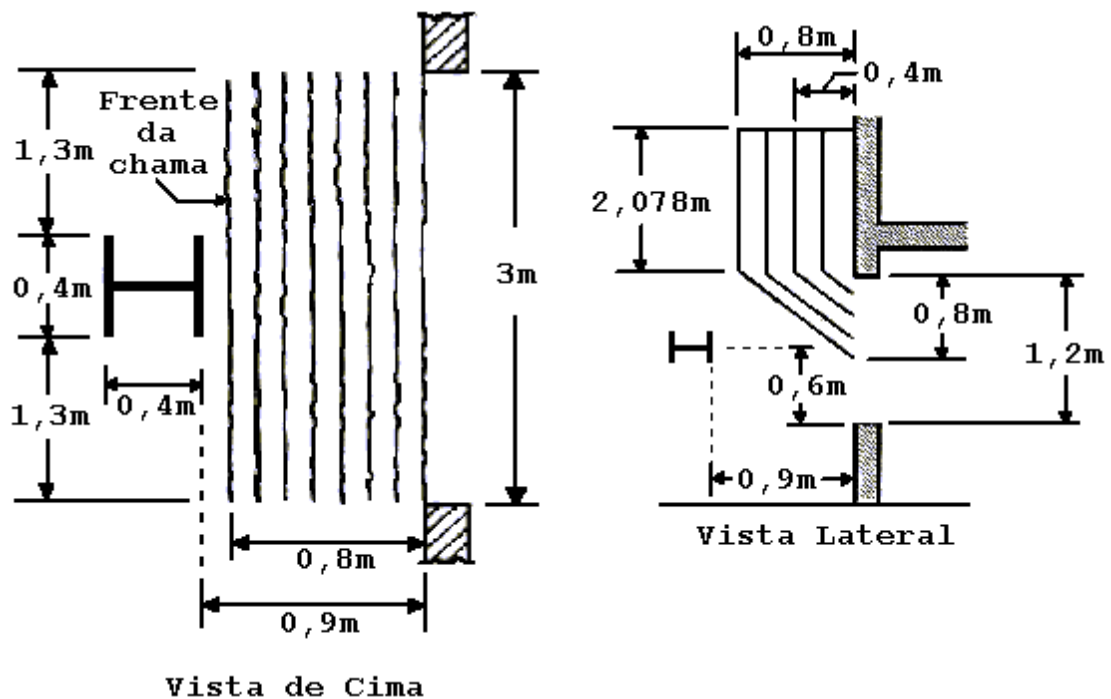


Figura 3.18: Chama como superfície irradiante, para ventilação natural

Face 1:

$$a = h'/S' = 2,078/0,3 = 6,927$$

$$b = \omega'/S' = 1,3/0,3 = 4,333$$

$$\phi_{z,1} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \text{tag}^{-1}(6,927) - \frac{1}{(1 + 4,333^2)^{0,5}} \text{tag}^{-1} \left[ \frac{6,927}{(1 + 4,333^2)^{0,5}} \right] \right\} = 0,191$$

Face 2:

$$\text{Idem face 1: } \phi_{z,2} = 0,191$$

Face 3:

• Lado direito:

$$a = h'/S' = 2,078/0,1 = 20,780$$

$$b = \omega_R'/S' = 1,5/0,1 = 15$$

$$\phi_{z,3R} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{20,780}{(1 + 20,780^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{15}{(1 + 20,780^2)^{0,5}} \right] + \frac{15}{(1 + 15^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{20,780}{(1 + 15^2)^{0,5}} \right] \right\} = 0,249$$

• Lado esquerdo:

Idem lado direito, pois o pilar encontra-se simetricamente centrado à frente da abertura.

$$\phi_{z,3L} = 0,249$$

Logo, o fator de configuração total para a face 3 do pilar fica:

$$\phi_{z,3} = \phi_{z,3R} + \phi_{z,3L} = 0,249 + 0,249 = 0,498$$

Face 4:

$\phi_{z,4} = 0 \Rightarrow$  a superfície irradiante não é vista pela face 4 da superfície receptora.

### 3.8.3.5.2.1.1 Fator de Configuração Total

Para o pilar utilizado, tem-se:

$$d_1 = d_2 = 0,4\text{m}$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1$$

$$\phi_z = \frac{(0,191 + 0,191)0,4 + (0,498 + 0)0,4}{(1 + 1)0,4 + (1 + 1)0,4} = 0,220$$

### 3.8.3.5.2.2 Ventilação Forçada

Para esta situação, o pilar encontra-se envolvido em chamas, de acordo com a figura 3.16. Portanto, tem-se  $\phi_z = 0$ .

### 3.8.3.6 Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

#### 3.8.3.6.1 Ventilação Natural

$$d = (0,4 + 0,4) / 2 = 0,4\text{m}$$

$$\alpha_z = 0,026 \left[ \frac{0,388}{3,6} \right]^{0,6} \left[ \frac{1}{0,4} \right]^{0,4} = 0,009 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

#### 3.8.3.6.2 Ventilação Forçada

$$\alpha_z = 0,0098 \left[ \frac{1}{0,4} \right]^{0,4} \left[ \frac{20}{3,6} + \frac{6}{1,6} \right]^{0,6} = 0,054 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

### 3.8.3.7 Absortividade da Chama

#### 3.8.3.7.1 Ventilação Natural

Como para a situação de ventilação natural, o pilar não se encontra envolvido em chamas, tem-se:  $a_z = 0$ .

#### 3.8.3.7.2 Ventilação Forçada

$$\varepsilon_{z,1} = 1 - e^{-0,3 \times 1,3} = 0,323$$

$$\varepsilon_{z,2} = 1 - e^{-0,3 \times 1,3} = 0,323$$

$$\varepsilon_{z,3} = 1 - e^{-0,3 \times 0,9} = 0,237$$

$$a_z = \frac{0,323 + 0,323 + 0,237}{3} = 0,294$$

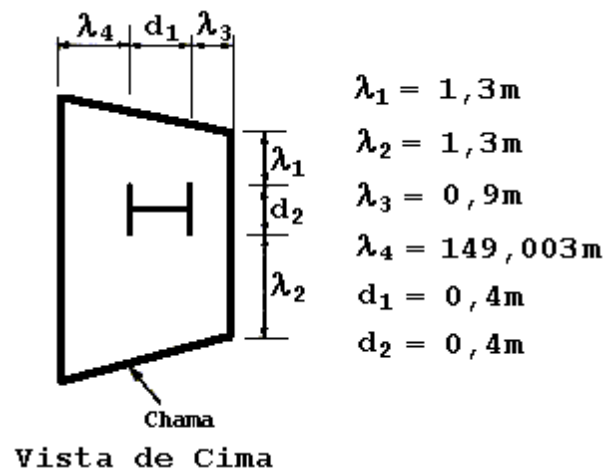


Figura 3.19: Pilar envolvido em chamas, para ventilação forçada

### 3.8.3.8 Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas

#### 3.8.3.8.1 Ventilação Natural

$$\sigma = 56,7 \times 10^{-12} \text{ kW } / (\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$$

$$I_f = 0,125 \times 1(1 - 0) \times 56,7 \times 10^{-12} \times (354,557 + 273,15)^4 = 1,100 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.3.8.2 Ventilação Forçada

$$I_f = 0,125 \times 1(1 - 0,294) \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1219,999 + 273,15)^4 = 24,872 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

### 3.8.3.9 Fluxo de Calor por Radiação das Chamas

#### 3.8.3.9.1 Ventilação Natural

$$I_z = 0,220 \times 0,213 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1047,631 + 273,15)^4 = 8,086 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.3.9.2 Ventilação Forçada

$$\epsilon_{z,4} = 1 - e^{-0,3 \times 149,003} = 1$$

$$I_{z,1} = 1 \times 0,323 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (805,305 + 273,15)^4 = 24,774 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,2} = 1 \times 0,323 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (805,305 + 273,15)^4 = 24,774 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,3} = 1 \times 0,237 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (806,702 + 273,15)^4 = 18,272 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_{z,4} = 1 \times 1 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (805,305 + 273,15)^4 = 76,699 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$I_z = \frac{(24,774 + 24,774) \times 0,4 + (18,272 + 76,699) \times 0,4}{2(0,4 + 0,4)} = 36,130 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

### 3.8.3.10 Temperatura Média do Aço

#### 3.8.3.10.1 Ventilação Natural

$$56,7 \times 10^{-12} (T_s + 273,15)^4 + 0,009 (T_s + 273,15) = 8,086 + 1,100 + 293 \times 0,009$$

$$T_s = 310,330^\circ \text{C}$$

#### 3.8.3.10.2 Ventilação Forçada

$$56,7 \times 10^{-12}(T_s + 273,15)^4 + 0,054(T_s + 273,15) = 36,130 + 24,872 + \\ + 0,054 \times (805,305 + 273,15)$$

$$T_s = 756,196^\circ\text{C}$$

A partir dos valores encontrados nos itens 3.8.3.10.1 e 3.8.3.10.2 dimensionam-se as estruturas de aço conforme a NBR 14323 (1).

#### 3.8.4 AQUECIMENTO DE VIGA EXTERNA SENDO A ABERTURA 12 x 3m

Para a exemplificação de viga, utiliza-se uma viga soldada série VS-400x78. Considera-se, aqui, que os flanges da viga estejam sem proteção.

##### 3.8.4.1 Dimensões do Compartimento

A figura 3.20 ilustra o compartimento simples de incêndio com uma janela de 12m de largura por 3m de altura, estando a viga paralela e imediatamente adjacente à parede externa do compartimento.

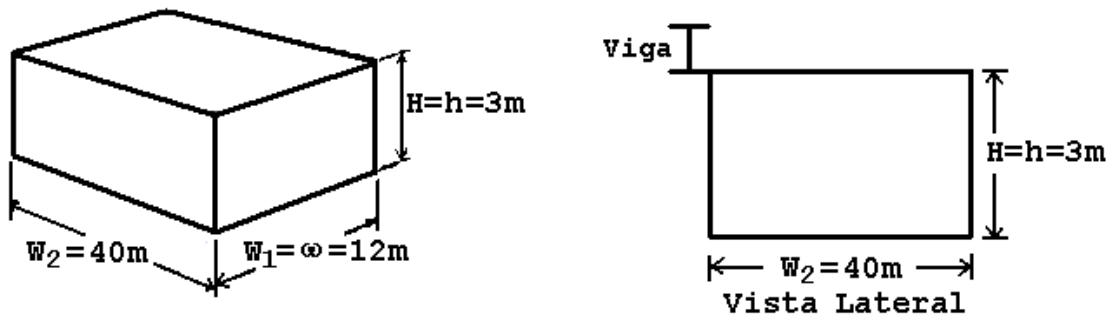


Figura 3.20: Dimensões do compartimento

Conforme já calculado para o exemplo 3.8.1, tem-se:

$$A_F = 480\text{m}^2; \quad A_\omega = 36\text{m}^2; \quad A_T = 1236\text{m}^2; \quad D / W = 10 / 3$$

#### 3.8.4.2. Carga Total de Incêndio

$$G = 50\text{kg/m}^2 \Rightarrow L = 50 \times 480 = 24000\text{kg}$$

#### 3.8.4.3 Sob Condições de Ventilação Natural

##### 3.8.4.3.1 Condição de Queima-Livre

$$R_1 = \frac{24000}{1200} = 20\text{kg / s}$$

##### 3.8.4.3.2 Condição de Ventilação Controlada

$$\eta = \frac{1236}{36 \times 3^{1/2}} = 19,822\text{m}^{-1/2}$$

$$R_2 = \left[ 0,18 \left( 1 - e^{-0,036 \times 19,822} \right) \times 36 \left( 3 \times \frac{3}{10} \right)^{1/2} \right] = 3,136 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$



#### 3.8.4.3.3 Taxa de Queima

$$R_2 < R_1 \Rightarrow R = R_2 = 3,136 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \Rightarrow \text{Condição de ventilação controlada}$$

#### 3.8.4.3.4 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

$$\Psi = \frac{24000}{(36 \times 1236)^{1/2}} = 113,776 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$
$$T_f = 6000 \frac{(1 - e^{-0,1 \times 19,822})}{19,822^{1/2}} (1 - e^{-0,05 \times 113,776}) + 20 = 1178,059^\circ\text{C}$$

#### 3.8.4.3.5 Altura da Chama

Considera-se a ausência de toldo ou sacada acima da janela.

$$z = 12,8 \left[ \frac{3,136}{12} \right]^{2/3} - 3 = 2,232\text{m}$$

#### 3.8.4.3.6 Projeção Horizontal da Chama

Considera-se não haver parede acima da janela.

$$\chi = 0,6 \times 3(2,232 / 3)^{1/3} = 1,631\text{m}$$

#### 3.8.4.3.7 Largura da Chama

Largura da chama = 12m

#### 3.8.4.3.8 Profundidade da Chama

$$\text{Profundidade da chama} = 2 \times 3 / 3 = 2\text{m}$$

#### 3.8.4.3.9 Comprimento da Chama ao longo do Eixo

$$X = \left[ 2,232^2 + (1,631 - 3 / 3)^2 \right]^{1/2} + 3 / 2 = 3,819\text{m}$$

#### 3.8.4.3.10 Temperatura da Chama na Janela

$$T_o = 518 / [1 - 0,027(3,819 \times 12 / 3,136)] + 20 = 875,583^\circ\text{C}$$

#### 3.8.4.3.11 Emissividade na Janela

$$\varepsilon_f = 1$$

#### 3.8.4.3.12 Temperatura da Chama no Flange Inferior

$$l = 1,5\text{m}$$

$$T_{z,1} = (875,583 - 20) \left[ 1 - 0,027 \left( 1,5 \times \frac{12}{3,136} \right) \right] + 20 = 742,989^\circ\text{C}$$

#### 3.8.4.3.13 Temperatura da Chama no Flange Superior

$$l = 1,9\text{m}$$

$$T_{z,2} = (875,583 - 20) \left[ 1 - 0,027 \left( 1,9 \times \frac{12}{3,136} \right) \right] + 20 = 707,631^\circ\text{C}$$

### 3.8.4.3.14 Emissividade da Chama

Através da figura 3.21 observa-se que a viga encontra-se envolvida em chamas.

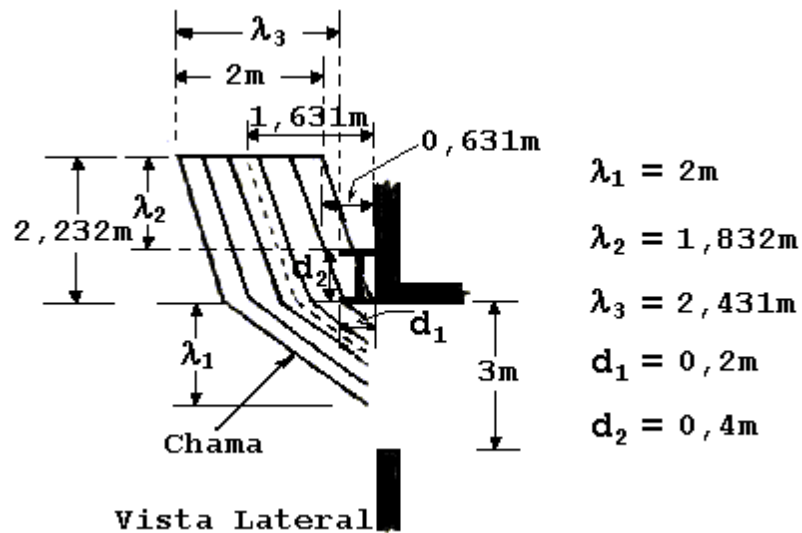


Figura 3.21: Dimensões da chama para ventilação natural

#### 3.8.4.3.14.1 Emissividade da Chama para o Flange Inferior

$$\epsilon_{z,1} = 1 - e^{-0,30 \times 2} = 0,451$$

#### 3.8.4.3.14.2 Emissividade da Chama para a Alma

$$\epsilon_{z,3} = 1 - e^{-0,30 \times 2,431} = 0,518$$

#### 3.8.4.3.14.3 Emissividade da Chama para o Flange Superior

$$\epsilon_{z,2} = 1 - e^{-0,30 \times 1,832} = 0,423$$

#### 3.8.4.4 Sob Condições de Ventilação Forçada

##### 3.8.4.4.1 Taxa de Queima

$$R = \frac{L}{\tau_F} = \frac{24000}{1200} = 20 \text{kg / s}$$

##### 3.8.4.4.2 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

$$T_f = 1200(1 - e^{-0,04 \times 113,776}) + 20 = 1207,333^\circ \text{C}$$

##### 3.8.4.4.3 Altura da Chama

Considera-se a velocidade do vento,  $u = 6 \text{m/s}$ .

$$z = 23,9 \left( \frac{1}{6} \right)^{0,43} \left( \frac{20}{36^{1/2}} \right) - 3 = 33,870 \text{m}$$

##### 3.8.4.4.4 Projeção Horizontal da Chama

$$\chi = 0,61 \left[ \frac{6^2}{3} \right]^{0,22} (33,870 + 3) = 38,853 \text{m}$$

##### 3.8.4.4.5 Largura da Chama

$$\omega_z \cong 12 + 0,4 \times 38,853 = 27,541 \text{m}$$

##### 3.8.4.4.6 Comprimento da Chama ao longo do Eixo

$$x = \left( 33,870^2 + 38,853^2 \right)^{1/2} = 51,543 \text{m}$$

#### 3.8.4.4.7 Temperatura da Chama na Janela

$$T_o = 518 / \left[ 1 - 0,019 \times 51,543 \times 36^{1/2} / 20 \right] + 20 = 753,498^\circ \text{C}$$

#### 3.8.4.4.8 Emissividade na Janela

$$\epsilon_f = 1$$

#### 3.8.4.4.9 Temperatura da Chama no Flange Inferior

As dimensões da chama, sob ventilação forçada, aparecem ilustradas na figura 3.3.

Como a viga é paralela à parede do compartimento e imediatamente adjacente à ela, considera-se que apenas o flange inferior esteja envolvido em chamas, conforme mostra a figura 3.22.

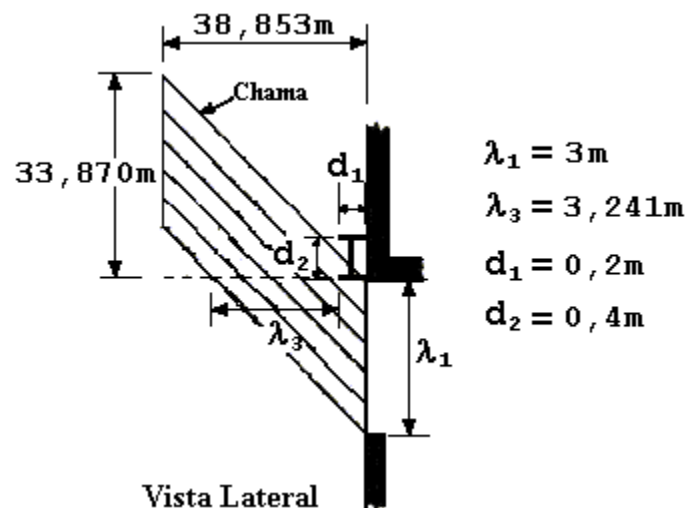


Figura 3.22: Dimensões da chama para ventilação forçada

$$\ell = 1,5\text{m}$$

$$T_{z,1} = \left[ 1 - 0,019 \frac{1,5 \times 36^{1/2}}{20} \right] (753,498 - 20) + 20 = 747,227^\circ\text{C}$$

Para esta situação, o software Fires (14) apresenta uma temperatura com aproximadamente 6°C a mais que a temperatura aqui calculada.

#### 3.8.4.4.10 *Temperatura da Chama no Flange Superior*

$$\ell = 1,9\text{m}$$

$$T_{z,2} = \left[ 1 - 0,019 \frac{1,9 \times 36^{1/2}}{20} \right] (753,498 - 20) + 20 = 745,554^\circ\text{C}$$

Para este caso, a temperatura apresentada através do software Fires (14) também supera a temperatura calculada em cerca de 6°C.

#### 3.8.4.4.11 *Emissividade da Chama*

##### 3.8.4.4.11.1 *Emissividade da Chama para o Flange Inferior*

$$\varepsilon_{z,1} = 1 - e^{-0,30 \times 3} = 0,593$$

##### 3.8.4.4.11.2 *Emissividade da Chama para a Alma*

$$\varepsilon_{z,3} = 1 - e^{-0,30 \times 3,241} = 0,622$$

### 3.8.4.4.11.3 Emissividade da Chama para o Flange Superior

$$\varepsilon_{z,2} = 1 - e^{-0,30 \times 3,4} = 0,639$$

### 3.8.4.5 Fator de Configuração

#### 3.8.4.5.1 Janela como Superfície Irradiante

A figura 3.23 ilustra a condição da janela se apresentar como superfície irradiante.

Face 1:

$$a = h'/S' = 3/0,1 = 30$$

$$b = \omega'/S' = 12/0,1 = 120$$

$$\phi_{f,1} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \text{tag}^{-1}(30) - \frac{1}{(1 + 120^2)^{0,5}} \text{tag}^{-1} \left[ \frac{30}{(1 + 120^2)^{0,5}} \right] \right\} = 0,244$$

Face 2:

$\phi_{f,2} = 0 \Rightarrow$  a superfície irradiante não é vista pela face 2 da superfície receptora.

Face 3:

$\phi_{f,3} = 0 \Rightarrow$  a superfície irradiante não é vista pela face 3 da superfície receptora.

Face 4:

$\phi_{f,4} = 0 \Rightarrow$  a face 4 da viga está imediatamente adjacente à parede.

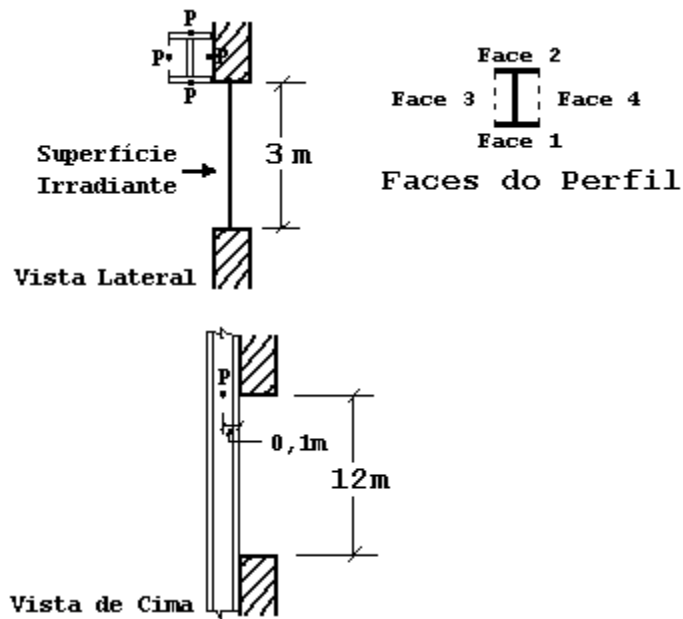


Figura 3.23: Janela como Superfície Irradiante

#### 3.8.4.5.1.1 Fator de Configuração Total

Para a viga em estudo, tem-se  $d_1 = 0,2\text{m}$  e  $d_2 = 0,4\text{m}$ .

Consideram-se as faces 1,2 e 3 da viga sem proteção, logo:

$$C_1 = C_2 = C_3 = 1$$

Como a viga está imediatamente adjacente à parede:  $C_4 = 0$ .

$$\phi_f = \frac{(0,244 + 0)0,2 + (0 + 0)0,4}{(1 + 1)0,2 + (1 + 0)0,4} = 0,061$$

#### 3.8.4.5.2 Chama como Superfície Irradiante

##### 3.8.4.5.2.1 Ventilação Natural

Devido à viga estar envolvida em chamas, tem-se  $\phi_z = 0$ .



### 3.8.4.5.2.2 Ventilação Forçada

Para este cálculo, deve-se observar as figuras 3.22 e 3.24.

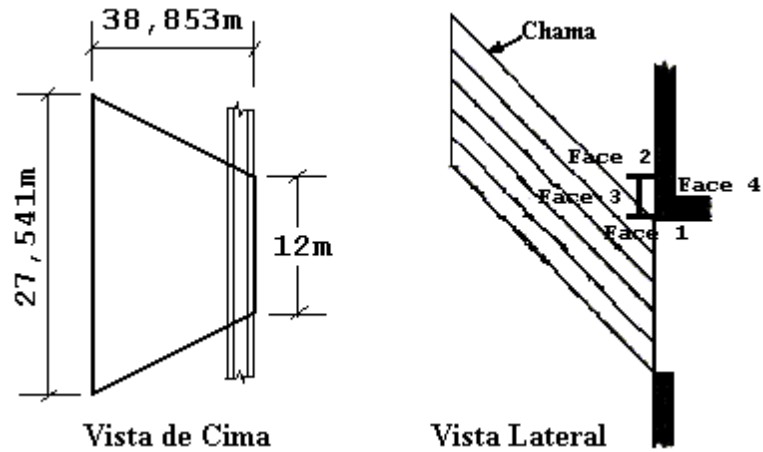


Figura 3.24: Chama como superfície irradiante, para ventilação forçada

Para esta situação, considera-se  $h'$  e  $\omega'$  relativos à chama.

Face 1:

Devido à face 1 estar envolvida pelas chamas, tem-se:

$$\phi_{z,1} = 0$$

Face 2:

$$a = h'/S' = 33,870/38,653 = 0,876$$

$$b = \omega'/S' = 27,541/38,653 = 0,713$$

$$\phi_{z,2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \text{tag}^{-1}(0,876) - \frac{1}{(1 + 0,713^2)^{0,5}} \text{tag}^{-1} \left[ \frac{0,876}{(1 + 0,713^2)^{0,5}} \right] \right\} = 0,034$$

Face 3:

$$a = h'/S' = 33,870/38,753 = 0,874$$

$$b = \omega'/S' = 27,541/38,753 = 0,711$$

$$\phi_{z,3} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{0,874}{(1 + 0,8740^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{0,711}{(1 + 0,8740^2)^{0,5}} \right] + \frac{0,711}{(1 + 0,711^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{0,874}{(1 + 0,711^2)^{0,5}} \right] \right\} = 0,109$$

Face 4:

$\phi_{z,4} = 0 \Rightarrow$  a face 4 da viga está imediatamente adjacente à parede.

#### 3.8.4.5.2.2.1 Fator de Configuração Total

Para a viga utilizada, tem-se:

$$d_1 = 0,2\text{m}; \quad d_2 = 0,4\text{m}$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = 1; \quad C_4 = 0$$

$$\phi_f = \frac{(0 + 0,034)0,2 + (0,109 + 0)0,4}{(1 + 1)0,2 + (1 + 0)0,4} = 0,063$$

#### 3.8.4.6 Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

##### 3.8.4.6.1 Ventilação Natural

$$d = (0,2 + 0,4) / 2 = 0,3\text{m}$$

$$\alpha_z = 0,026 \left[ \frac{3,136}{36} \right]^{0,6} \left[ \frac{1}{0,3} \right]^{0,4} = 0,009 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

#### 3.8.4.6.2 Ventilação Forçada

$$\alpha_z = 0,0098 \left[ \frac{1}{0,3} \right]^{0,4} \left[ \frac{20}{36} + \frac{6}{1,6} \right]^{0,6} = 0,038 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

#### 3.8.4.7 Absortividade da Chama

##### 3.8.4.7.1 Ventilação Natural

Para as vigas envolvidas em chamas, a absortividade da chama fica:

$$a_z = 1 - e^{-0,3 \times 3} = 0,593$$

##### 3.8.4.7.2 Ventilação Forçada

Como a viga aqui se encontra parcialmente envolvida em chamas, tem-se o mesmo valor encontrado para o caso de ventilação natural, ou seja:  $a_z = 0,593$ .

#### 3.8.4.8 Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas

##### 3.8.4.8.1 Ventilação Natural

$$\sigma = 56,7 \times 10^{-12} \text{KW} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^4)$$

$$I_f = 0,061 \times 1(1 - 0,593) \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1178,059 + 273,15)^4 = 6,243 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

##### 3.8.4.8.2 Ventilação Forçada

$$I_f = 0,061 \times 1(1 - 0,593) \times 56,7 \times 10^{-12} \times (1207,333 + 273,15)^4 = 6,763 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

### 3.8.4.9 Fluxo de Calor por Radiação das Chamas

#### 3.8.4.9.1 Ventilação Natural

##### 3.8.4.9.1.1. Flange Inferior

$$I_{z,1} = 0,451 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (875,583 + 273,15)^4 = 44,528 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

##### 3.8.4.9.1.2 Alma

$$I_{z,3} = 0,518 \times 56,7 \times 10^{-12} \times [(742,989 + 273,15)^4 + (707,631 + 273,15)^4] / 2 = 29,245 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

##### 3.8.4.9.1.3 Flange Superior

$$I_{z,2} = 0,423 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (707,631 + 273,15)^4 = 22,193 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.4.9.1.4 Fluxo de Calor Total por Radiação das Chamas

$$I_z = \frac{(44,528 + 22,193)0,2 + (29,245 + 0)0,4}{2(0,2 + 0,4)} = 20,869 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.4.9.2 Ventilação Forçada

##### 3.8.4.9.2.1. Flange Inferior

$$I_{z,1} = 0,593 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (753,498 + 273,15)^4 = 37,353 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.4.9.2.2 Alma

$$I_{z,3} = 0,622 \times 56,7 \times 10^{-12} \times [(747,227 + 273,15)^4 + (745,554 + 273,15)^4] / 2 = 38,106 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.4.9.2.3 Flange Superior

$$I_{z,2} = 0,639 \times 56,7 \times 10^{-12} \times (745,554 + 273,15)^4 = 39,044 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.4.9.2.4 Fluxo de Calor Total por Radiação das Chamas

$$I_z = \frac{(37,353 + 39,044)0,2 + (38,106 + 0)0,4}{2(0,2 + 0,4)} = 25,435 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### 3.8.4.10 Temperatura Média do Aço

##### 3.8.4.10.1 Ventilação Natural

$$56,7 \times 10^{-12}(T_s + 273,15)^4 + 0,009(T_s + 273,15) = 20,869 + 6,243 + \\ + 0,009 \times \left( \frac{742,989 + 707,631}{2} + 273,15 \right)$$

$$T_s = 569^\circ \text{C}$$

##### 3.8.4.10.2 Ventilação Forçada

$$56,7 \times 10^{-12}(T_s + 273,15)^4 + 0,038(T_s + 273,15) = 25,435 + 6,763 + \\ + 0,038 \times \left( \frac{747,227 + 745,554}{2} + 273,15 \right)$$

$$T_s = 624,600^\circ \text{C}$$

A partir dos valores encontrados nos itens 3.8.4.10.1 e 3.8.4.10.2 dimensionam-se as estruturas de aço conforme a NBR 14323 (1).

## **4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### 4.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram abordados aspectos da determinação da temperatura do aço para os elementos estruturais externos de edifícios em situação de incêndio.

Dentro deste contexto, mostrou-se como determinar as temperaturas máximas do incêndio que acontece no compartimento, o tamanho e as temperaturas das chamas provenientes das aberturas e também os parâmetros de radiação e convecção.

Pode-se calcular a temperatura do incêndio, que ocorre na área compartimentada, de acordo com as dimensões do compartimento, o grau e o tipo de ventilação e a carga de incêndio.

Mostrou-se também que, para ter as condições de transferência de calor para as estruturas externas deve-se saber o posicionamento da viga ou pilar em relação à abertura, além de se distinguir uma peça envolvida de uma não envolvida em chamas.

Observou-se que, para o caso de ventilação forçada, sendo dada uma determinada taxa de queima, o vento pode influenciar no tamanho e na direção da chama externa.

Portanto, para o cálculo da temperatura máxima atingida pela peça externa de aço, deve-se considerar a temperatura da chama tanto ao longo de seu eixo quanto na janela, a temperatura do incêndio dentro do compartimento e a temperatura do ambiente externo. Além do mais, para a temperatura final do aço, deve-se diferenciar a condição da peça no que se diz respeito a ela estar envolvida ou não em chamas.

Um parâmetro importante para a obtenção da temperatura na peça de aço é o chamado fator de configuração, que varia de acordo com o posicionamento da viga ou pilar em relação à abertura, com as condições de ventilação e com a localização das faces da peça em relação à superfície irradiante estimada, que pode ser a chama ou a própria abertura. O fator de configuração depende também das dimensões da peça estrutural externa.

Com relação aos exemplos apresentados, pode-se concluir que a temperatura do incêndio dentro de um determinado compartimento, dada uma certa carga de incêndio, é maior no caso em que há a condição de ventilação forçada. Ao se considerar dois compartimentos de incêndio com as mesmas dimensões, para uma mesma carga de incêndio, quanto menor a abertura, menor a temperatura final atingida pelo aço para o caso de ventilação natural, pois nesse caso a área total do compartimento é maior, apresentando uma menor taxa de queima com menor temperatura de incêndio dentro do compartimento. Para essa situação as dimensões da chama foram também menores, porém as temperaturas da chama foram maiores. O fluxo de calor por radiação da abertura foi menor, mas o fluxo das chamas foi maior. Ainda considerando a mesma comparação, porém agora para ventilação forçada, a



taxa de queima é a mesma para as duas aberturas, mas o compartimento com menor abertura apresenta maior temperatura de incêndio em seu interior, com maiores temperaturas e dimensões da chama. Aqui o fluxo de calor por radiação da abertura foi maior e o fluxo proveniente das chamas foi menor ocasionando uma maior temperatura final para o pilar externo. Ao se distanciar os pilares da fachada do edifício, pode se conseguir que esses deixem de estar envolvidos nas chamas, para o caso de ventilação natural e, com isso, atinjam menor temperatura.

#### 4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de aumentar os conhecimentos com relação aos elementos estruturais externos de aço em situação de incêndio outros trabalhos poderiam ser desenvolvidos nessa área, tais como:

- Desenvolvimento de um software para a verificação de estruturas externas de aço, em situação de incêndio;
- Avaliação comparativa entre o método de cálculo apresentado e métodos mais elaborados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio - NBR 14323, 1999.
2. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - Design of steel structures - Part 1-2: general rules - structural fire design. Eurocode 3 - ENV 1993-1-2. Brussels, 1995.
3. LAW, M., Fire safety of external building elements - the design approach. Engineering Journal/American Institute of Steel Construction, 2<sup>nd</sup> Quarter, p.59-74, 1978.
4. AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI). Fire - safe structural steel - A design guide. Washington, D.C., 1979.
5. SEIGEL, L.G., Fire test of an exterior exposed steel spandrel girder. Materials Research and Standards, p.10-13, February, 1970.
6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), ASTM E-119-2000, Standard test. Methods for fire tests of building construction and materials. New York, 2000.
7. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - Fire resistance tests - elements of building construction - ISO 834. Switzerland, 1975.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo - NBR 5627, Novembro, 1980.
9. IYENGAR, H.; BAKER, W.F.; SINN, R.C., Broadgate exchange house: structural systems. The Structural Engineer, v.71,n.9, p.149-159, May, 1993.
10. BAKER, W.F.; IYENGAR, H.; JOHNSON, R.; SINN, R.C., Bare bone buildings. Civil Engineering, p.42-45, November, 1996.
11. DHIMA, D.; FOUQUET, G.; JOYEUX, D.; KRUPPA, J. ; ZHAO, B., Experimental and numerical assessment of the behaviour of external heavy steel columns under natural fire. Journal of Constructional Steel Research, v.46, n.1-3, paper n. 173, 1998.
12. HOSSER, D.; DORN, T.; NEUMANN, P.; SIEGFRIED, W., Vereinfachter Brandschutznachweis für außenliegende Stahlbauteile. Stahlbau 65, Heft 2, 1996.
13. FAKURY, R.H.; MARTINS, M.M., Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio, Relatório final de Estudos Especiais, Departamento de Engenharia de Estruturas, EEUFMG, 1998.
14. FIRES. Calculation of the temperature in the external steel according to Eurocode 3 part 10, April, 1990.

## **BIBLIOGRAFIA**

ABREU, L.M.P. de, Elevação da temperatura dos elementos estruturais de aço em incêndio, Relatório de Iniciação Científica, Departamento de Engenharia de Estruturas, EEUFMG, 1999.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI). Fire - safe structural steel - A design guide. Washington, D.C., 1979.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), ASTM E-119-2000, Standard test. Methods for fire tests of building construction and materials. New York, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio - NBR 14323, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo - NBR 5627, Novembro, 1980.

BAKER, W.F. ; IYENGAR, H. ; JOHNSON, R. ; SINN, R.C., Bare bone buildings. Civil Engineering, p.42-45, November, 1996.

BRAIMI, N.P.; MARCHANT E.W., Behaviour of steel structures in fire conditions. *The Structural Engineer*, v.73, n.15, p.247-249, August, 1995.

CAMPOS, A de S.; PALMEIRA, M. de F., Estruturas de aço externas a edificações em situação de incêndio. São Paulo, 1999. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

COZZA, E., Uma nova era para o aço. *Téchne*, n.36, p.18-23, Set/Out, 1998.

DHIMA, D.; FOUQUET, G. ; JOYEUX, D.; KRUPPA, J. ; ZHAO, B., Experimental and numerical assessment of the behaviour of external heavy steel columns under natural fire. *Journal of Constructional Steel Research*, v.46, n.1-3, paper n. 173, 1998.

DIAS, L.A. de M., Estruturas de aço - conceitos, técnicas e linguagem. São Paulo, Zigurate Editora e Comercial Ltda, 2.ed., 1998.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - Design of steel structures - Part 1-2: general rules - structural fire design. Eurocode 3 - ENV 1993-1-2. Brussels 1995.

FAKURY, R.H.; MARTINS, M.M., Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio, Relatório final de Estudos Especiais, Departamento de Engenharia de Estruturas, EEUFMG, 1998.

FIRES. Calculation of the temperature in the external steel according to Eurocode 3 part 10, April, 1990.

HOLMAN, J.P., Transferência de calor. São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil, 1983.

HOSSER, D. ; DORN, T. ; NEUMANN, P. ; SIEGFRIED, W., Vereinfachter Brandschutznachweis für außenliegende Stahlbauteile. Stahlbau 65, Heft 2, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - Fire resistance tests - elements of building construction - ISO 834. Switzerland, 1975.

IYENGAR, H.; BAKER, W.F.; SINN, R.C., Broadgate exchange house: structural systems. The Structural Engineer, v.71,n.9, p.149-159, May, 1993.

LAW, M., Fire safety of external building elements - the design approach. Engineering Journal/American Institute of Steel Construction, 2<sup>n</sup> Quarter, p.59-74, 1978.

MELHADO, S.B.; SOUZA, U.E.L. de, Segurança contra incêndio nos edifícios de estrutura de aço, Escola Politécnica da USP, Núcleo de Tecnologia da Construção Metálica, Janeiro, 1988.

OLESZKIEWICZ, I., Vertical separation of windows using spandrel walls and horizontal projections. Fire Technology, p.334-340, November, 1991.

ÖZISIK, M.N., Transferência de calor - um texto básico. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Koogan S.A., 1990.

RODRIGUES, C.C., Pressurização de escadas. Técnica, n.41, p.79-84, Jul/Ago, 1999.

SEIGEL, L.G., Fire test of an exterior exposed steel spandrel girder. Materials Research and Standards, p.10-13, February, 1970.

WYLEN, G.J.V.;SONNTAG, R.E., Fundamentos da termodinâmica clássica. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1973.

ZEMANSKY, M.W., Calor e termodinâmica. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A. 5.ed., 1978.

## ANEXO - DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS EXTERNOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

### A.1 DIMENSÕES DO COMPARTIMENTO DE INCÊNDIO

#### A.1.1 COMPARTIMENTO SIMPLES DE INCÊNDIO

Para um compartimento de incêndio em sua forma mais simples, conforme ilustra a figura A.1, tem-se as seguintes fórmulas para o cálculo de suas dimensões:

$$A_F = W_1 \cdot W_2 \quad (\text{A.1})$$

$$A_{\omega} = \omega \cdot h \quad (\text{A.2})$$

$$A_T = 2A_F + 2H(W_1 + W_2) - A_{\omega} \quad (\text{A.3})$$

$$D / W = W_2 / W_1 \quad (\text{A.4})$$

onde:

$\omega$  = largura da janela ou soma das larguras das janelas em todas as paredes,  $[\omega] = \text{m}$ ;

$h$  = altura da janela ou média ponderada das alturas das janelas em todas as paredes,  $[h] = \text{m}$ ;



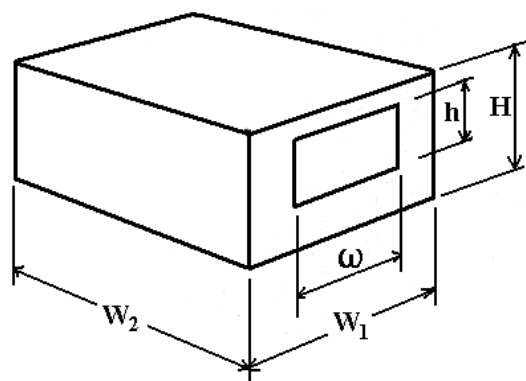
$A_{\omega}$  = área da janela ou soma da área das janelas em todas as paredes,  $[A_{\omega}] = m^2$ ;

$D$  = profundidade do cômodo ou compartimento,  $[D] = m$ ;

$W$  = largura da parede, a qual contém a janela ou as janelas,  $[W] = m$ ;

$A_F$  = área de piso,  $[A_F] = m^2$ ;

$A_T$  = área total do piso, teto e paredes menos a área da janela,  $[A_T] = m^2$ .



$$A_F = W_1 \cdot W_2$$

$$A_{\omega} = \omega \cdot h$$

$$A_T = 2A_F + 2H(W_1 + W_2) - A_{\omega}$$

$$D/W = W_2/W_1$$

Figura A.1: Compartimento simples de incêndio

#### A.1.2 COMPARTIMENTO COM MAIS QUE UMA JANELA

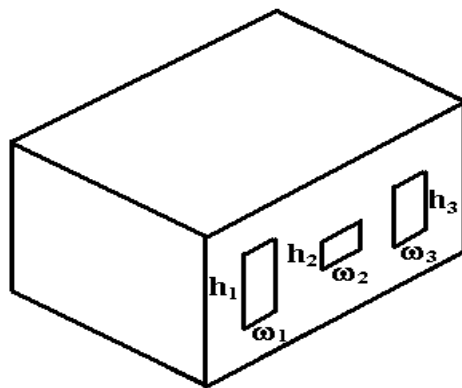
Um compartimento com mais que uma janela na parede encontra-se ilustrado na figura A.2. Calcula-se as suas dimensões como a seguir:

$$A_1 = \omega_1 h_1 \quad ; \quad A_2 = \omega_2 h_2 \quad \text{etc} \quad (\text{A.5})$$

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 + \text{etc} \quad (\text{A.6})$$

$$A_{\omega} = A_1 + A_2 + \text{etc} \quad (\text{A.7})$$

$$h = \frac{A_1 h_1 + A_2 h_2 + \text{etc}}{A_{\omega}} \quad (\text{A.8})$$



$$\begin{aligned} A_1 &= \omega_1 h_1 ; A_2 = \omega_2 h_2 \text{ etc.} \\ \omega &= \omega_1 + \omega_2 + \text{etc.} \\ A_{\omega} &= A_1 + A_2 + \text{etc.} \\ h &= \frac{A_1 h_1 + A_2 h_2 + \text{etc.}}{A_{\omega}} \end{aligned}$$

Figura A.2: Compartimento com mais que uma janela

### A.1.3 COMPARTIMENTO COM JANELAS EM MAIS QUE UMA PAREDE

Este caso encontra-se ilustrado na figura A.3 e pode-se calcular as suas dimensões a partir das seguintes fórmulas:

$$A_{\omega} = A_{\omega 1} + A_{\omega 2} + \text{etc} \quad (\text{A.9})$$

$$D / W = \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{A_{\omega 1}}{A_{\omega 2}} \quad (\text{A.10})$$

onde:

$A_{\omega 1}$  = área da janela na parede 1;

$A_{\omega 2}$  = área da janela na parede 2, etc.

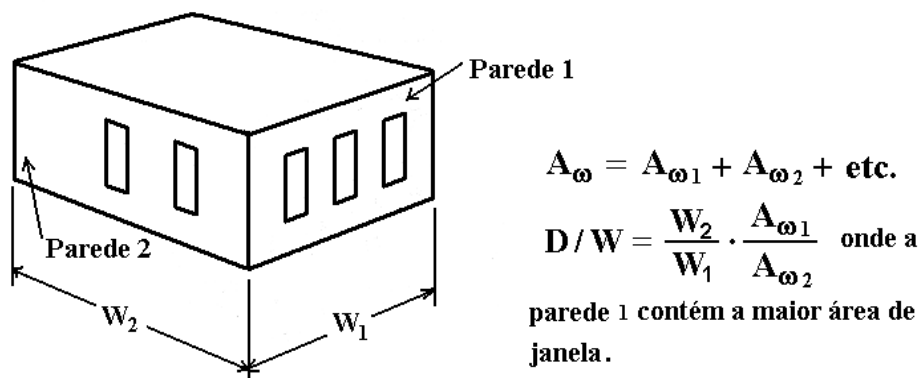


Figura A.3: Compartimento com janelas em mais de uma parede

#### A.1.4 COMPARTIMENTO COM UM NÚCLEO

Havendo um núcleo no compartimento incendiado, de acordo com a figura A.4, utilizam-se as equações que seguem:

$$A_F = W_1 W_2 - c_1 c_2 \quad (\text{A.11})$$

$$A_T = 2A_F + 2H(W_1 + W_2 + c_1 + c_2) - A_{\omega} \quad (\text{A.12})$$

$$D / W = \frac{(W_2 - c_2)}{(W_1 - c_1)} \cdot \frac{A_{\omega 1}}{A_{\omega}} \quad (\text{A.13})$$

onde:

$c_1$  = comprimento do núcleo,  $[c_1] = \text{m}$ ;

$c_2$  = largura do núcleo,  $[c_2] = \text{m}$ ;

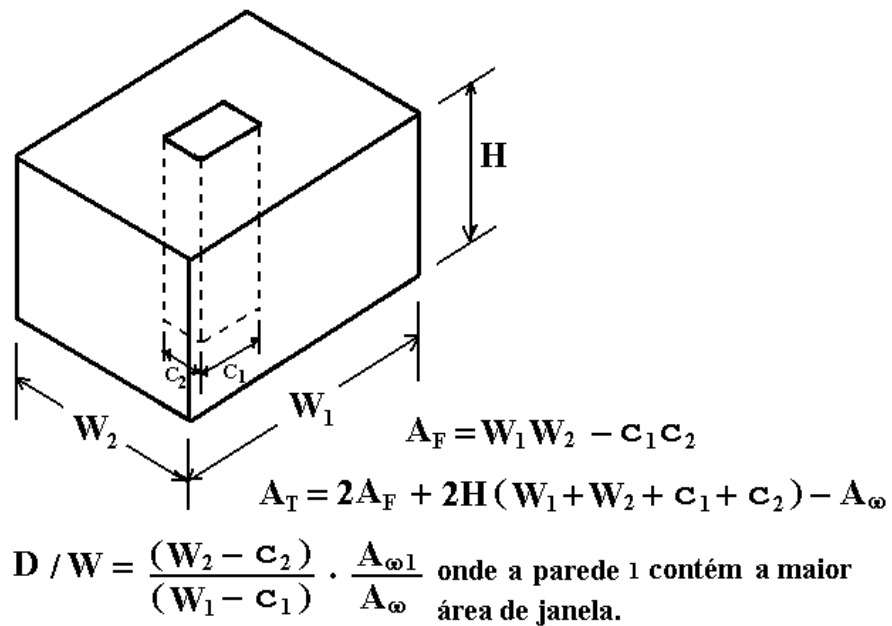


Figura A.4: Compartimento com um núcleo

## A.2 CARACTERÍSTICAS DO INCÊNDIO E DA CHAMA

### A.2.1 VENTILAÇÃO NATURAL

#### A.2.1.1 Taxa de Queima

Calcula-se a taxa de queima  $R$  através da equação A.14 e também da equação A.15:

$$R = \frac{L}{t_F} \quad (\text{A.14})$$

$$R = \left[ 0,18 \left( 1 - e^{-0,036\eta} \right) A_\omega \left( h \frac{W}{D} \right)^{1/2} \right] \quad (\text{A.15})$$

sendo:

$$\eta = \frac{A_T}{A_\omega h^{1/2}} ; \quad L = q \times A_F$$

onde:

$q$  = densidade de carga de incêndio,  $[q] = \text{kg/m}^2$ ;

$L$  = carga de incêndio,  $[L] = \text{kg/s}$ ;

$t_F$  = duração do incêndio a queima-livre,  $[t_F] = \text{s}$ ;

$R$  = taxa de queima,  $[R] = \text{kg/s}$ .

Caso o resultado da equação A.15 seja o de menor valor, significa que há a condição de ventilação controlada, uma vez que a duração do incêndio,  $t_F$ , na equação A.14 é sob condições de queima-livre.

#### A.2.1.2 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

Determina-se a temperatura do incêndio dentro do compartimento utilizando-se a equação a seguir:

$$T_f = 6000 \frac{(1 - e^{-0,1\eta})}{\eta^{1/2}} (1 - e^{-0,05\Psi}) + 20 \quad (\text{A.16})$$

sendo:

$$\Psi = L / (A_\omega A_T)^{1/2}$$

onde:

$T_f$  é a temperatura de incêndio,  $[T_f] = ^\circ\text{C}$ .

### A.2.1.3 Altura da Chama

Deve-se utilizar a equação a seguir para o cálculo da altura da chama  $z$ :

$$z + h = 12,8 \left[ \frac{R}{\omega} \right]^{2/3} \quad (\text{A.17})$$

sendo:

$(z+h)$  = altura do topo da chama acima da base da janela, a qual tem altura  $h$ ;  $[z+h] = m$ .

A altura da chama, assim também como as outras dimensões da projeção da chama externa podem ser observadas na figura A.5.

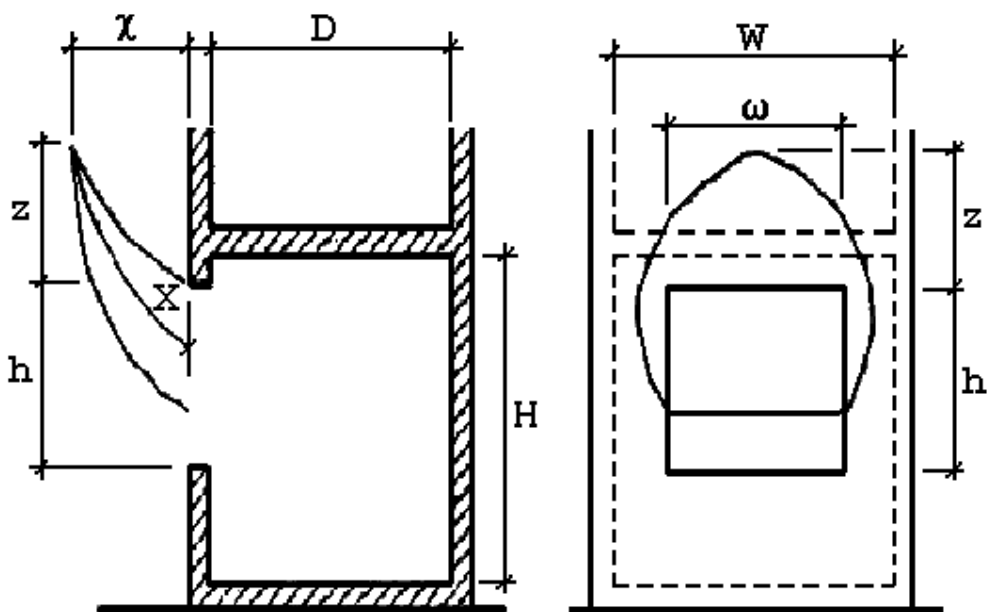


Figura A.5: Dimensões usadas nos cálculos da projeção da chama

Caso haja um toldo ou uma sacada localizada no nível do topo da janela, em toda a sua largura, ocasionando uma projeção horizontal igual a  $h_a$ , conforme mostra a figura A.6, então deve-se modificar o valor de  $z$ , dado pela fórmula A.17, como a seguir:

- considerando parede acima da janela e  $h \leq 1,25\omega$ , diminui-se  $z$  por  $h_a\sqrt{2}$ ;
- sem parede acima da janela, ou para a situação  $h > 1,25\omega$ , diminui-se  $z$  por  $h_a$ ;

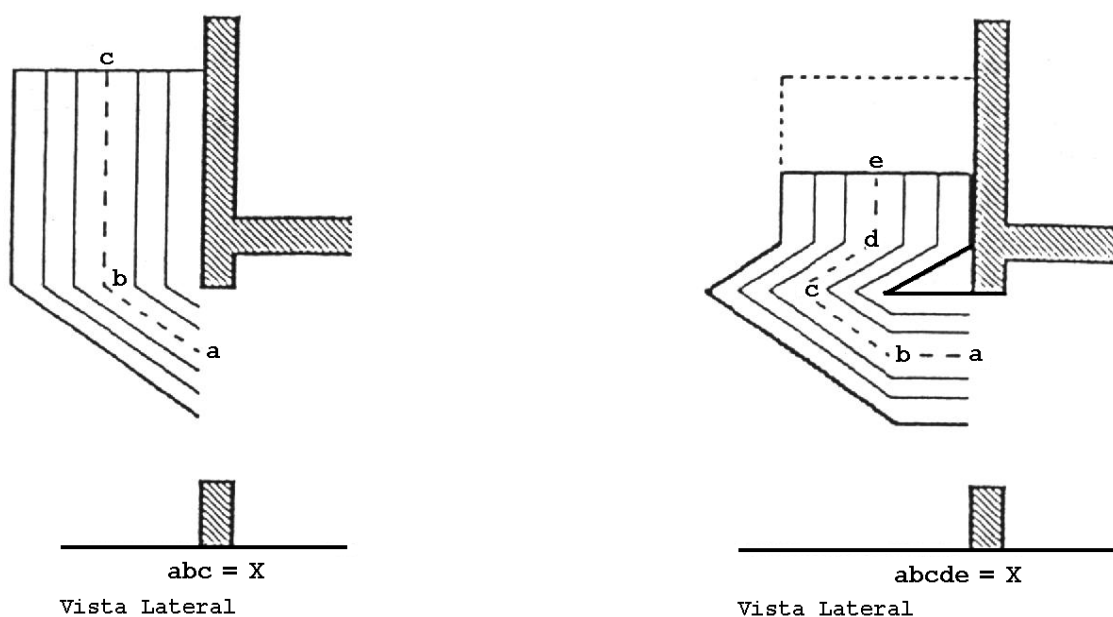


Figura A.6: Inclinação da chama por uma sacada

#### A.2.1.4 Largura da Chama

Considera-se que esta seja igual à largura da própria janela, conforme pode-se observar na figura A.7.

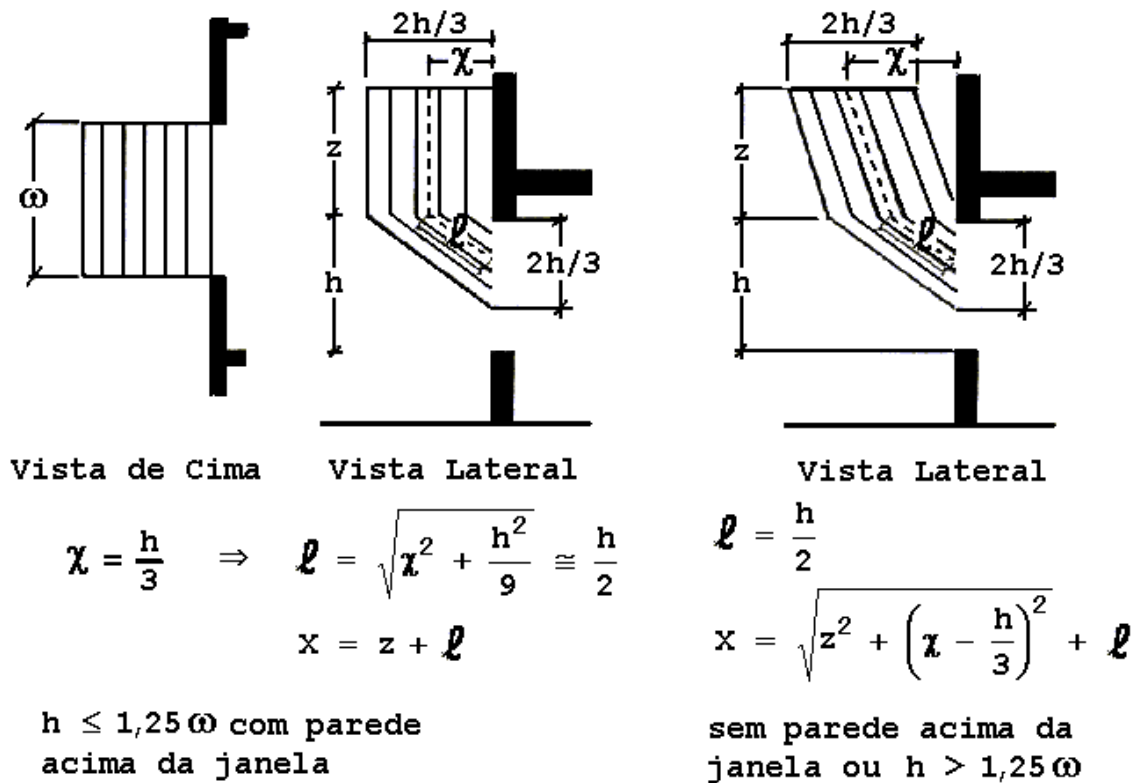


Figura A.7: Dimensões da chama para ventilação natural

#### A.2.1.5 Profundidade da Chama

De acordo com a figura A.7, a profundidade da chama é 2/3 da altura da janela, ou seja,  $2h/3$ .

#### A.2.1.6 Projeção Horizontal da Chama

Havendo parede acima da janela, calcula-se a projeção horizontal da chama de acordo com as seguintes situações:

- para  $h \leq 1,25\omega$ :  $\chi = h / 3$  (A.18)



- para  $h > 1,25\omega$  e a distância a qualquer outra janela maior que  $4\omega$ : 
$$\chi = 0,3h(h / \omega)^{0,54} \quad (\text{A.19})$$

- outros casos: 
$$\chi = 0,454h(h / 2\omega)^{0,54} \quad (\text{A.20})$$

Não havendo parede acima da janela, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\chi = 0,6h(z / h)^{1 / 3} \quad (\text{A.21})$$

onde:

$\chi$  = projeção horizontal da chama,  $[\chi]$  = m.

#### A.2.1.7 Comprimento da Chama ao longo do seu Eixo

Deve-se calcular o valor de  $X$ , comprimento da chama ao longo do seu eixo, utilizando-se a fórmula A.22 ou A.23, de acordo com as seguintes situações:

- parede acima da janela e ainda na condição de  $h \leq 1,25\omega$ :

$$X = z + h / 2 \quad (\text{A.22})$$

- sem parede acima da janela ou, se houver parede, para o caso de  $h > 1,25\omega$ :

$$X = \left[ z^2 + (\chi - h / 3)^2 \right]^{1 / 2} + h / 2 \quad (\text{A.23})$$

#### A.2.1.8 Temperatura da Chama na Janela

$$T_o = 518 / [1 - 0,027(X \cdot \omega / R)] + 20 \quad (\text{A.24})$$

onde:

$T_o$  = temperatura da chama na janela,  $[T_o] = ^\circ\text{C}$ ;

$X$  = comprimento da chama ao longo do seu eixo,

$[X] = \text{m}$ .

#### A.2.1.9 Emissividade na Janela

A emissividade na janela é um termo adimensional e unitário:

$$\varepsilon_f = 1 \quad (\text{A.25})$$

#### A.2.1.10 Temperatura da Chama ao longo do seu Eixo

Determina-se a temperatura da chama em um determinado ponto do seu eixo, usando a seguinte equação:

$$T_z = (T_o - 20)[1 - 0,027(\ell \cdot \omega / R)] + 20 \quad (\text{A.26})$$

Para os pilares envolvidos ou não em chamas e para as vigas não envolvidas, obtém-se o valor de  $\ell$  através da seguinte equação:

$$\ell = h / 2 \quad (\text{A.27})$$

Para as vigas totalmente ou parcialmente envolvidas em chamas, determina-se a temperatura da chama no flange inferior e no flange superior,  $T_{z,1}$  e  $T_{z,2}$  respectivamente.  $T_{z,1}$  e  $T_{z,2}$  são calculadas através da equação A.26 e o valor de  $l$  é medido da janela até o ponto onde o cálculo for feito.

#### A.2.1.11 Emissividade da Chama

Calcula-se a emissividade das chamas que emergem das janelas através da equação A.28:

$$\epsilon_z = 1 - e^{-0,30\lambda} \quad (\text{A.28})$$

onde:

$\lambda$  = espessura das chamas,  $[\lambda] = \text{m}$ .

Estando o pilar em frente a uma abertura, utiliza-se a espessura das chamas,  $\lambda$ , no nível do topo das aberturas. Desde que não haja toldo ou sacada acima da abertura,  $\lambda$  pode ser obtido através da relação A.29:

$$\lambda = 2h / 3 \quad (\text{A.29})$$

Se o pilar estiver situado entre duas aberturas, as emissividades totais  $\epsilon_{z,m}$  e  $\epsilon_{z,n}$  das chamas nas faces  $m$  e  $n$  devem ser determinadas a partir da expressão A.28, onde calcula-se  $\lambda$  como segue:

- para a face m: 
$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_j \quad (\text{A.30})$$

- para a face n: 
$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_j \quad (\text{A.31})$$

sendo que obtém-se a espessura da chama na abertura  $j$ ,  $\lambda_j$ , através da seguinte fórmula:

$$\lambda_j = \omega_j \quad (\text{A.32})$$

## A.2.2 VENTILAÇÃO FORÇADA

### A.2.2.1 Taxa de Queima

Sob condições de ventilação forçada, utiliza-se a fórmula A.14 para o cálculo da taxa de queima, isto é,  $R = L / \tau_F$ .

### A.2.2.2 Temperatura do Incêndio dentro do Compartimento

Obtém-se o valor do parâmetro  $T_f$ , temperatura do incêndio dentro do compartimento, a partir da equação A.33:

$$T_f = 1200(1 - e^{-0,04\psi}) + 20 \quad (\text{A.33})$$

onde:

$$\Psi = L / (A_{\omega} A_T)^{1/2}$$

#### A.2.2.3 Altura da Chama

Neste trabalho será utilizada a relação A.34, publicada pelo Eurocode 3, Part 1-2 (2), para o cálculo da altura da chama.

$$z = 23,9 \left( \frac{1}{u} \right)^{0,43} \left( \frac{R}{A_{\omega}^{1/2}} \right) - h \quad (\text{A.34})$$

onde:

$u$  = velocidade do vento,  $[u] = \text{m/s}$ .

#### A.2.2.4 Projeção Horizontal da Chama

A equação A.35 é a apropriada ao cálculo da projeção horizontal da chama.

$$\chi = 0,61 \left[ \frac{u^2}{h} \right]^{0,22} (z + h) \quad (\text{A.35})$$

#### A.2.2.5 Largura da Chama

Pode-se observar a largura máxima das chamas emergentes na figura A.8 e calculá-la utilizando a seguinte equação:

$$\omega_z \cong \omega + 0,4\chi \quad (\text{A.36})$$

onde:

$\omega_z$  = largura da chama,  $[\omega_z] = \text{m}$ ;

$\omega$  = largura da janela,  $[\omega] = \text{m}$ .

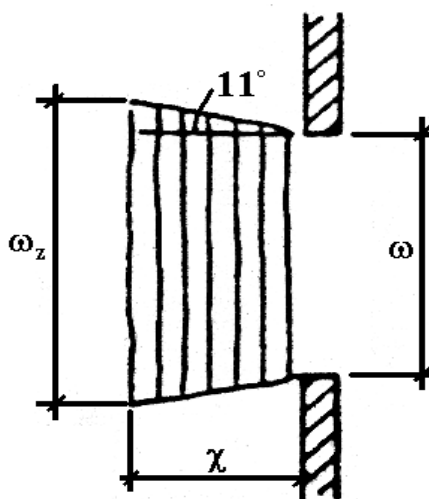


Figura A.8: Vista de cima das chamas emergentes com ventilação forçada

#### A.2.2.6 Comprimento da Chama ao longo do Eixo

Pode-se calcular o comprimento da chama a partir de simples considerações geométricas, como ilustrado na figura A.9. Logo, obtém-se o valor de X com o uso da seguinte equação:

$$X = (z^2 + \chi^2)^{1/2} \quad (\text{A.37})$$

#### A.2.2.7 Temperatura da Chama na Janela

Calcula-se a temperatura da chama na janela de acordo com a equação A.38, apresentada pelo Eurocode 3, Part 1-2 (2):

$$T_o = 518 / [1 - 0,019X(A_\omega)^{1/2} / R] + 20 \quad (\text{A.38})$$

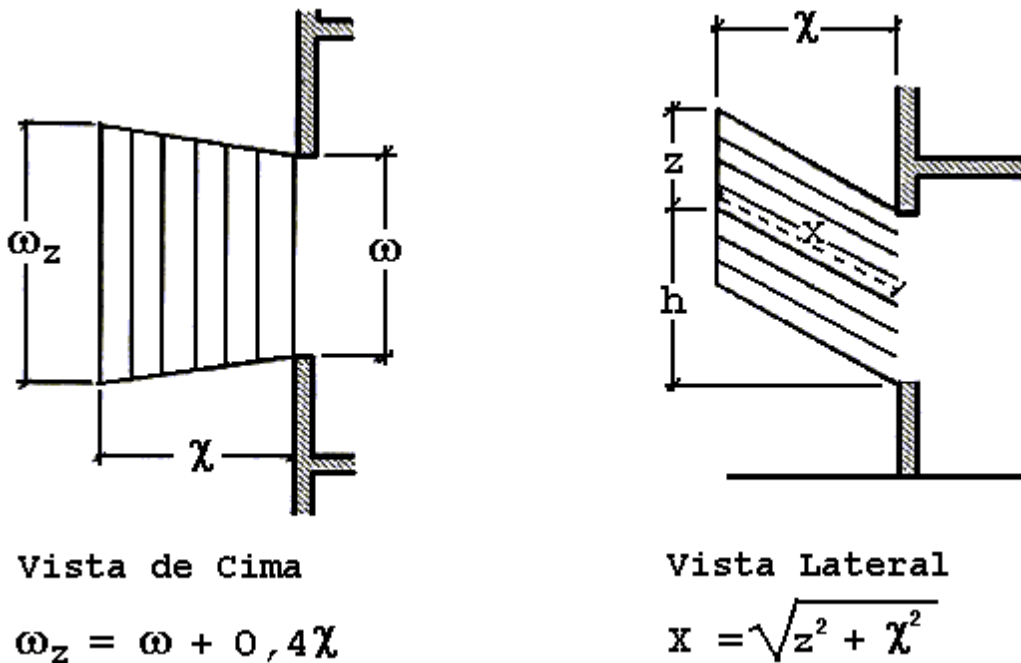


Figura A.9: Dimensões da chama para ventilação forçada

#### A.2.2.8 Emissividade na Janela

Aqui também utiliza-se a equação A.25, ou seja,  $\epsilon_f = 1$ .

#### A.2.2.9 Temperatura da Chama ao longo do Eixo

Calcula-se a temperatura da chama ao longo do seu eixo a partir da relação A.39:

$$T_z = \left[ 1 - 0,019 \frac{\ell(A\omega)^{1/2}}{R} \right] (T_o - 20) + 20 \quad (\text{A.39})$$

Calcula-se o valor de  $\ell$  de acordo com a situação e o tipo de peça.

##### A.2.2.9.1 Pilares não Envolvidos em Chamas

Para o pilar em frente a uma abertura, tem-se:

$$\ell = 0 \quad (\text{A.40})$$

Para o pilar situado entre aberturas e desde que não haja toldo ou sacada acima da abertura, pode-se calcular o valor de  $\ell$  através de equação seguinte:

$$\ell = SX / \chi \quad (\text{A.41})$$



sendo que a dimensão  $S$  encontra-se ilustrada nas figuras A.10 e A.11.

#### A.2.2.9.2 Vigas não Envolvidas em Chamas

Para uma viga paralela à parede externa do compartimento incendiado, estando ela acima de uma abertura, usa-se a equação A.40.

Para uma viga perpendicular à parede externa do compartimento incendiado, estando ela entre aberturas, obtém-se o valor de  $\ell$  a partir da equação A.41, desde que não haja toldo ou sacada acima da abertura.

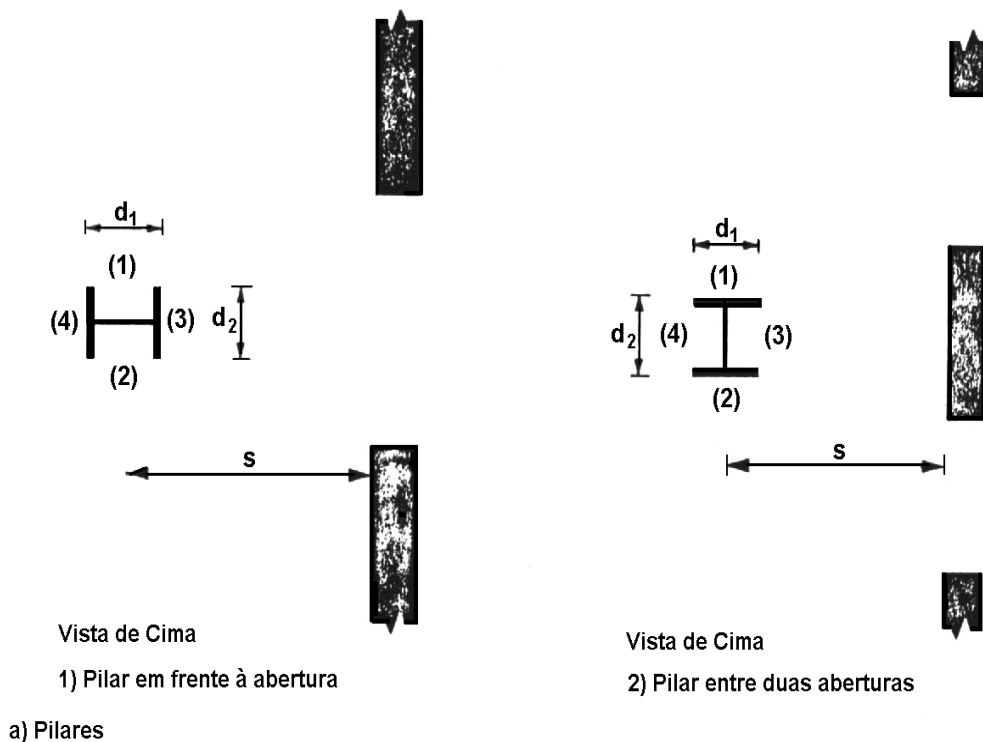


Figura A.10: Dimensões e faces dos pilares

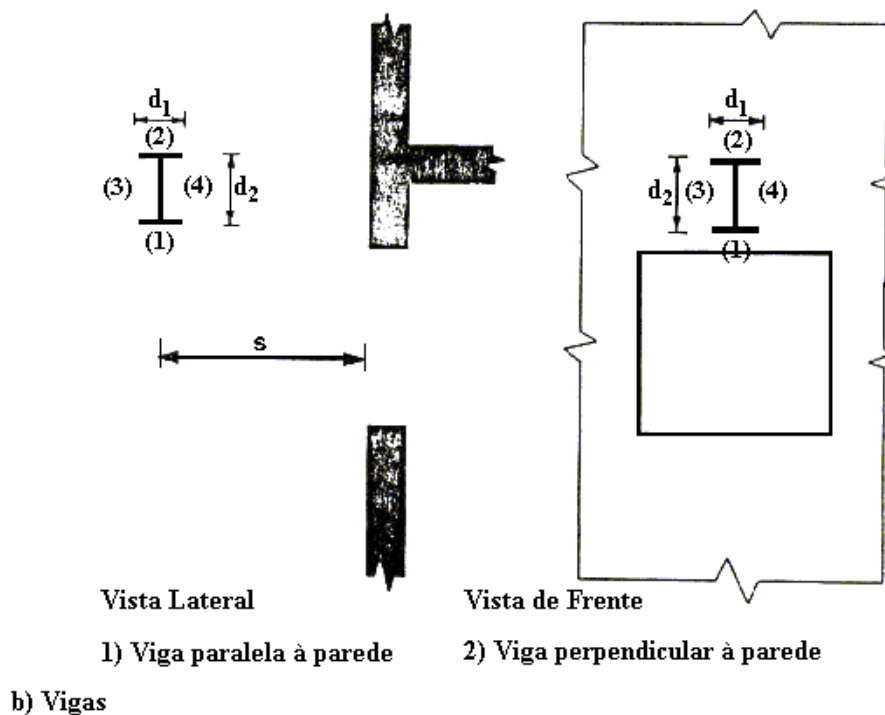


Figura A.11: Dimensões e faces das vigas

#### A.2.2.9.3 Pilares Envolvidos em Chamas

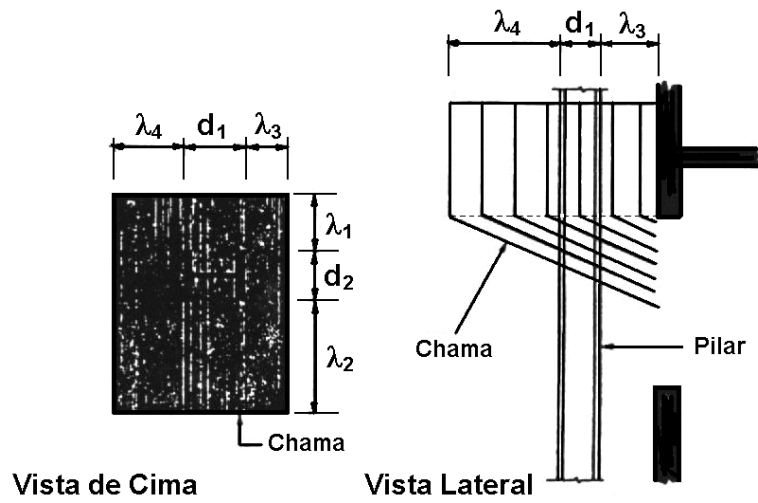
Desde que não haja sacada ou toldo acima da abertura, pode-se calcular o valor de  $l$  como a seguir:

$$l = (\lambda_3 + 0,5d_1)X / \chi \quad (\text{A. 42})$$

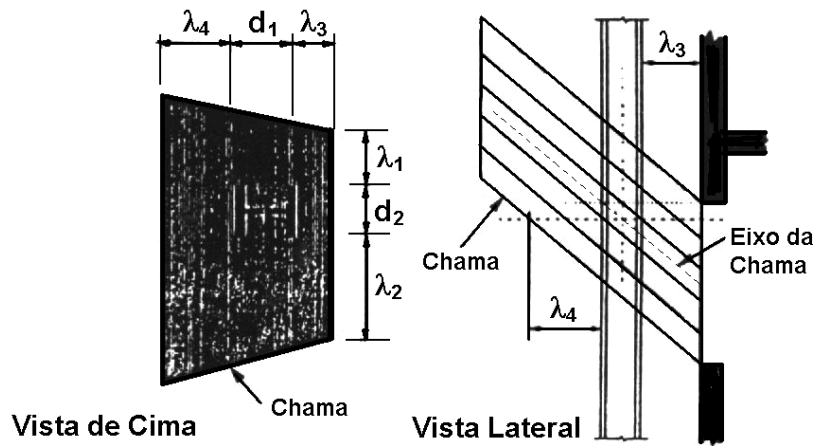
$$\text{mas } l \leq 0,5hX / z$$

onde  $l$  é a distância do eixo da chama até o nível onde  $\lambda_j$  for medido.

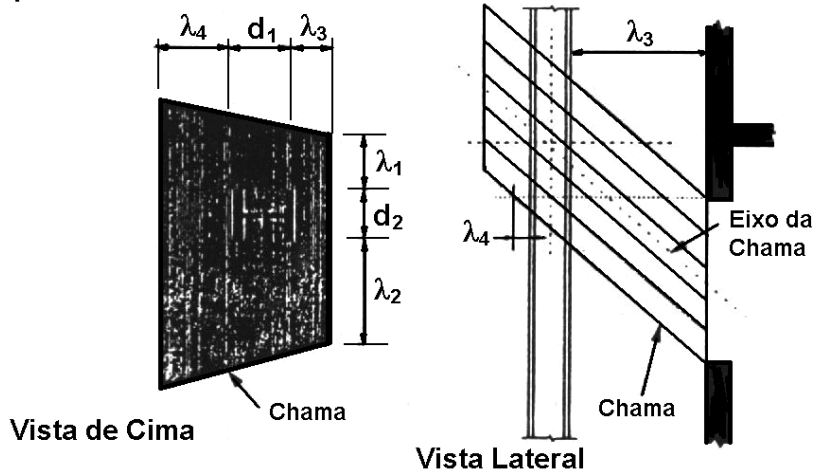
Os parâmetros da equação A.42 se encontram ilustrados na figura A.12.



a) "Sem Ventilação Forçada"



1) O eixo da chama intercepta o eixo do pilar abaixo do topo da abertura



2) O eixo da chama intercepta o eixo do pilar acima do topo da abertura

b) "Ventilação Forçada"

Figura A.12: Pilar envolvido em chamas

#### A.2.2.9.4 Vigas Totalmente ou Parcialmente Envolvidas em Chamas

Para esta situação, determina-se a temperatura da chama no flange inferior e no flange superior,  $T_{z,1}$  e  $T_{z,2}$  respectivamente.  $T_{z,1}$  e  $T_{z,2}$  são calculadas através da equação A.39 e o valor de  $\ell$  é medido da janela até o ponto onde o cálculo for feito.

#### A.2.2.10 Emissividade da Chama

Sob condições de ventilação forçada, determina-se a emissividade da chama,  $\varepsilon_z$ , a partir da equação A.28. Porém, para o pilar em frente a uma abertura, tem-se a equação seguinte para a determinação de  $\lambda$ :

$$\lambda = \chi \quad \text{mas} \quad \lambda \leq h\chi / z \quad (\text{A.43})$$

Se o pilar estiver situado entre duas aberturas, utiliza-se as equações A.30 e A.31 para o cálculo de  $\lambda$ . Entretanto a espessura da chama  $\lambda_j$  passa a ser calculada pela fórmula a seguir:

$$\lambda_j = \omega_j + 0,4S \quad (\text{A.44})$$

### A.3 EQUILÍBRIO TÉRMICO

#### A.3.1 PEÇAS NÃO ENVOLVIDAS EM CHAMAS

Para uma peça não envolvida em chamas, determina-se a temperatura média do aço,  $T_s$ , a partir da solução da seguinte equação de equilíbrio térmico:

$$\sigma(T_s + 273,15)^4 + \alpha_z(T_s + 273,15) = \Sigma I_z + \Sigma I_f + 293\alpha_z \quad (\text{A.45})$$

onde:

$\sigma$  = constante de Stefan - Boltzmann, cujo valor é  $56,7 \times 10^{-12} \text{ kW / (m}^2 \cdot \text{°C}^4)$ ;

$\alpha_z$  = coeficiente de transferência de calor por convecção da chama,  $[\alpha_z] = \text{kW / (m}^2 \cdot \text{°C)}$ ;

$T_s$  = temperatura média do aço,  $[T_s] = \text{°C}$ ;

$I_z$  = fluxo de calor por radiação da chama,  $[I_z] = \text{kW/m}^2$ ;

$I_f$  = fluxo de calor por radiação das aberturas correspondentes.  $[I_f] = \text{kW/m}^2$ .

##### A.3.1.1 Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas

Deve-se determinar o fluxo de calor por radiação proveniente de uma abertura, utilizando-se da seguinte equação:

$$I_f = \phi_f \varepsilon_f (1 - a_z) \sigma (T_f + 273,15)^4 \quad (\text{A.46})$$

onde:

$\phi_f$  = fator de configuração total da peça para transferência de calor por radiação da abertura;

$\varepsilon_f$  = emissividade da abertura, igual a unidade;

$a_z$  = absorptividade das chamas;

$T_f$  = temperatura do incêndio,  $[T_f] = ^\circ\text{C}$ .

#### A.3.1.2 Fluxo de Calor por Radiação das Chamas

Para peças não envolvidas em chamas, o valor de  $I_z$  é determinado de acordo com o tipo de peça.

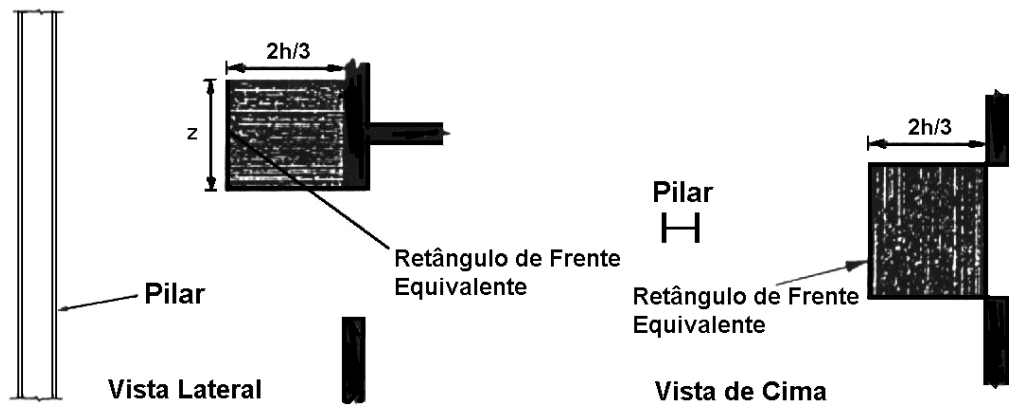
- Para pilares:

- se o pilar estiver em frente a uma abertura, conforme ilustra a figura A.13, tem-se a equação A.47:

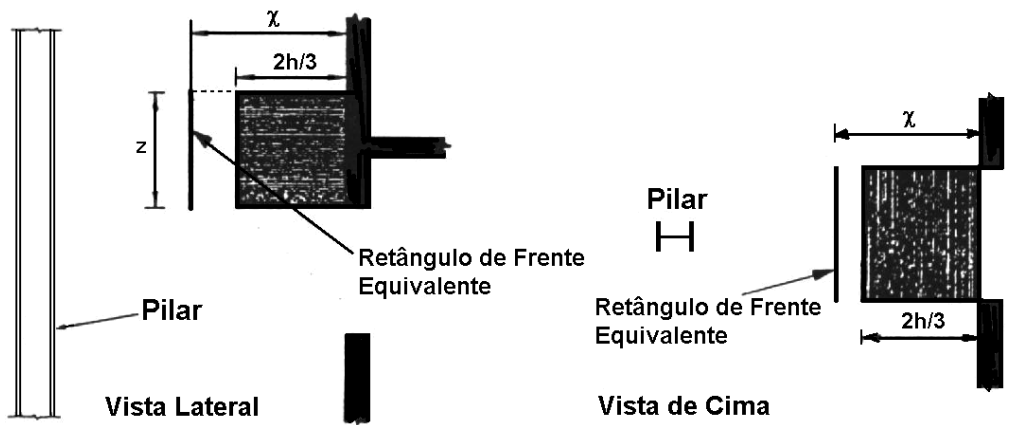
$$I_z = \phi_z \varepsilon_z \sigma (T_z + 273,15)^4 \quad (\text{A.47})$$

onde:

$\phi_z$  = fator de configuração total da peça para transferência de calor por radiação da chama.

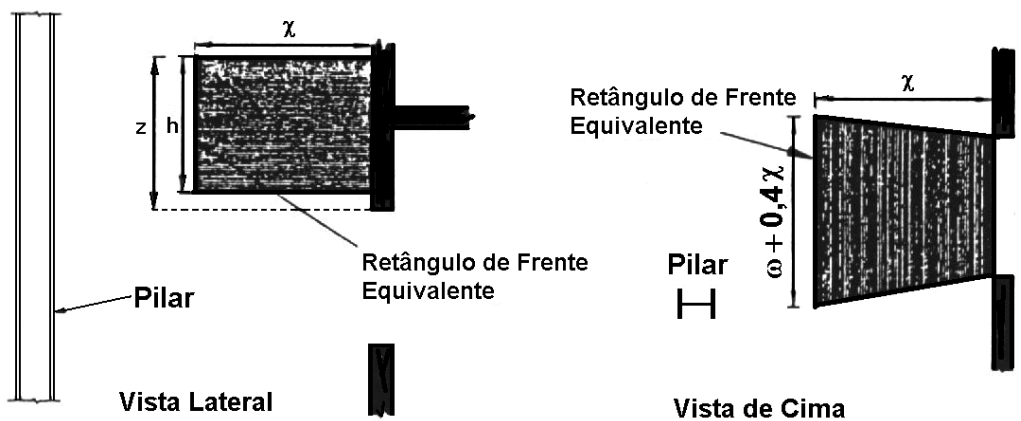


1) Parede Superior e  $h < 1,25\omega$



2) Parede Superior e  $h > 1,25\omega$  ou nenhuma parede superior

a) "Sem ventilação forçada".



b) "Ventilação forçada".

Figura A.13: Pilar em frente a uma abertura

- se o pilar estiver situado entre aberturas, de acordo com a figura A.14, deve-se determinar o valor de  $I_z$ , em cada face, como a seguir:

$$I_z = (\phi_{z,m}\epsilon_{z,m} + \phi_{z,n}\epsilon_{z,n})\sigma(T_z + 273,15)^4 \quad (\text{A.48})$$

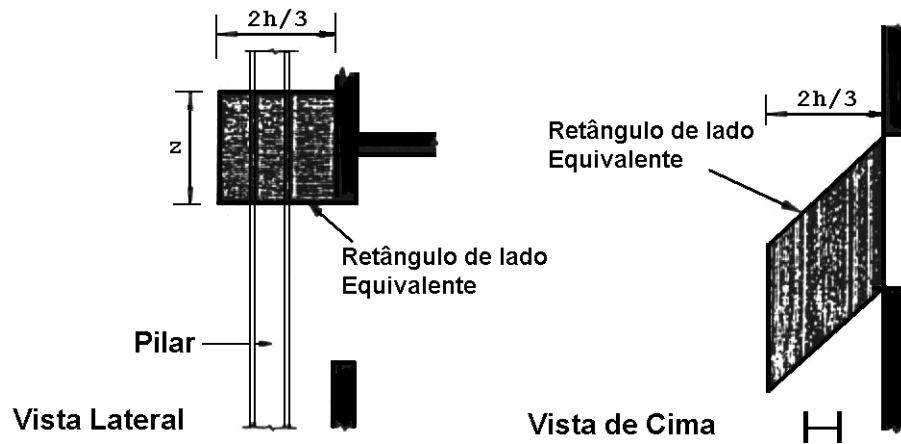
onde:

- $\phi_{z,m}$  = fator de configuração total do pilar para aquecimento a partir do lado m das chamas;
- $\phi_{z,n}$  = fator de configuração total do pilar para aquecimento a partir do lado n das chamas;
- $\epsilon_{z,m}$  = emissividade total das chamas no lado m;
- $\epsilon_{z,n}$  = emissividade total das chamas no lado n.

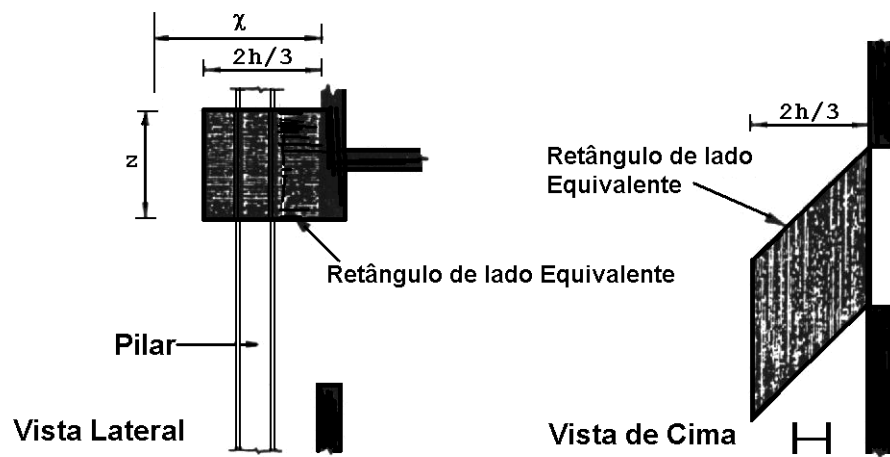
- Para vigas:

- se a viga estiver paralela à parede externa do compartimento, deve-se calcular o valor de  $I_z$  através da equação A.47;
- se a viga estiver perpendicular à parede externa do compartimento incendiado, utiliza-se a equação A.48 para o cálculo do fluxo de calor por radiação,  $I_z$ , proveniente das chamas.



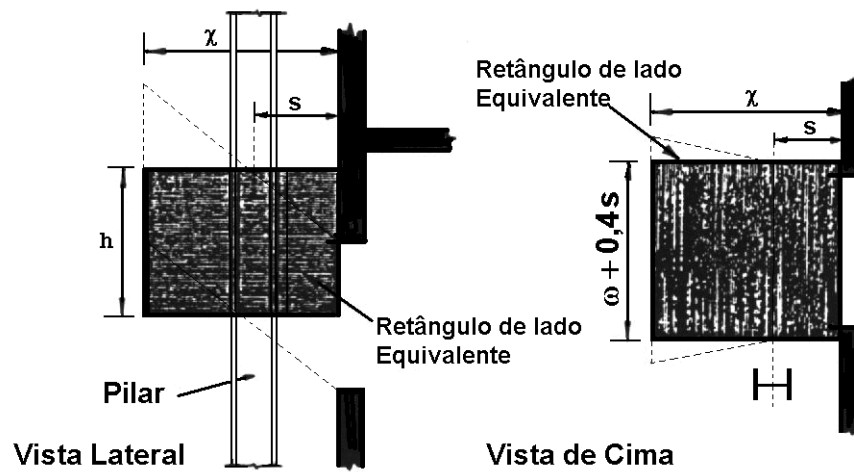


1) Parede superior e  $h < 1,25\omega$



2) Parede superior e  $h > 1,25\omega$  ou sem parede superior.

a) "Sem ventilação forçada".



b) "Ventilação forçada".

Figura A.14: Pilar entre aberturas

### A.3.1.3 Convecção das Chamas e Gases Quentes

Quando há ventilação natural, tem-se o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $\alpha_z$ , através da seguinte equação:

$$\alpha_z = 0,026 \left[ \frac{R}{A_\omega} \right]^{0,6} \left[ \frac{1}{d} \right]^{0,4} \quad (\text{A.49})$$

onde:

$\alpha_z$  = coeficiente de transferência de calor por convecção,  $[\alpha_z] = \text{kw/m}^2\text{°C}$ .

Quando se tratar de situações com ventilação forçada, deve-se usar a equação A.50 para o cálculo de  $\alpha_z$ :

$$\alpha_z = 0,0098 \left[ \frac{1}{d} \right]^{0,4} \left[ \frac{R}{A_\omega} + \frac{u}{1,6} \right]^{0,6} \quad (\text{A.50})$$

sendo:

$d = (d_1 + d_2)/2$ , com  $d_1$  e  $d_2$  representados nas figuras A.10 e A.11.

### A.3.1.4 Absortividade das Chamas

Para condições de ventilação natural, considera-se a absortividade da chama,  $a_z$ , igual a zero. Porém, sob

condições de ventilação forçada, deve-se considerar  $a_z$  igual à emissividade da chama,  $\epsilon_z$ .

### A.3.2 PEÇAS ENVOLVIDAS EM CHAMAS

Para uma peça envolvida em chamas, obtém-se a temperatura média do aço,  $T_s$ , a partir da solução da seguinte equação de equilíbrio térmico:

$$\sigma(T_s + 273,15)^4 + \alpha_z(T_s + 273,15) = I_z + I_f + \alpha_z(T_z + 273,15) \quad (\text{A.51})$$

#### A.3.2.1 Fluxo de Calor por Radiação das Aberturas

Determina-se o fluxo de calor por radiação proveniente de uma abertura, utilizando-se equação A.46.

#### A.3.2.2 Fluxo de Calor por Radiação das Chamas

Também para as peças envolvidas em chamas, determina-se o fluxo de calor por radiação de acordo com o tipo de peça.

#### A.3.2.2.1 Pilares Envolvidos em Chamas

$$I_z = \frac{(I_{z,1} + I_{z,2})d_1 + (I_{z,3} + I_{z,4})d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (\text{A.52})$$

com:

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma (T_z + 273,15)^4;$$

$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_z + 273,15)^4;$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma (T_o + 273,15)^4;$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma (T_z + 273,15)^4;$$

onde:

$I_{z,j}$  = fluxo de calor por radiação da chama na face  $j$  do pilar;

$\varepsilon_{z,j}$  = emissividade das chamas em relação à face  $j$  do pilar;

$j$  = indicador da face do pilar (1), (2), (3) ou (4);

$C_j$  = coeficiente de proteção da face  $j$  da barra;

$T_z$  = temperatura da chama,  $[T_z] = ^\circ\text{C}$ ;

$T_o$  = temperatura da chama na abertura,  $[T_o] = ^\circ\text{C}$ .

sendo: que:

- $T_o$  é obtida da equação A.24, caso a situação seja de ventilação natural ou da equação A.38 sob condições de ventilação forçada;
- $T_z$  é obtida da equação A.26 para o caso de ventilação natural ou da equação A.39 se a situação for de ventilação forçada.

#### A.3.2.2.2. Vigas Totalmente ou Parcialmente Envolvidas em Chamas

Determina-se o fluxo de calor por radiação das chamas,  $I_z$ , através da equação A.52.

##### A.3.2.2.2.1 Ventilação Natural

Sob condições de ventilação natural, pode-se ter duas situações distintas:

- Se o topo da chama estiver acima do nível do topo da viga, calcula-se o fluxo de calor por radiação a partir das equações a seguir:

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma (T_o + 273,15)^4 \quad (\text{A.53})$$

$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_{z,2} + 273,15)^4 \quad (\text{A.54})$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (\text{A.55})$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (\text{A.56})$$

sendo que  $T_{z,1}$  é medida no nível da parte inferior da viga e  $T_{z,2}$  no nível do topo da viga.

Porém, no caso de uma viga paralela à parede externa do compartimento incendiado,  $C_4$  pode ser tomado como zero se a viga estiver imediatamente adjacente à parede, conforme ilustra a figura A.15.

- Se o topo da chama estiver abaixo do nível do topo da viga, calcula-se o fluxo de calor por radiação a partir das equações a seguir:

$$I_{z,2} = 0 \quad (\text{A.57})$$

$$I_{z,3} = (h_z / d_2) C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma [(T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4] / 2 \quad (\text{A.58})$$

$$I_{z,4} = (h_z / d_2) C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma [(T_{z,1} + 273,15)^4 + (1086,15)^4] / 2 \quad (\text{A.59})$$

onde:

$h_z$  = altura até o topo da chama, acima da parte inferior da viga.

Para a face 1 da viga, utiliza-se a equação A.53.

#### A.3.2.2.2.2 Ventilação Forçada

Sob condições de ventilação forçada, calcula-se o fluxo de calor por radiação da chama de acordo com o posicionamento das vigas, conforme a figura A.15:

- Para uma viga paralela à parede, mas não imediatamente adjacente à ela, ou para uma viga perpendicular à parede, tem-se:

$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_{z,2} + 273,15)^4 \quad (\text{A. 60})$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (\text{A. 61})$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (\text{A. 62})$$

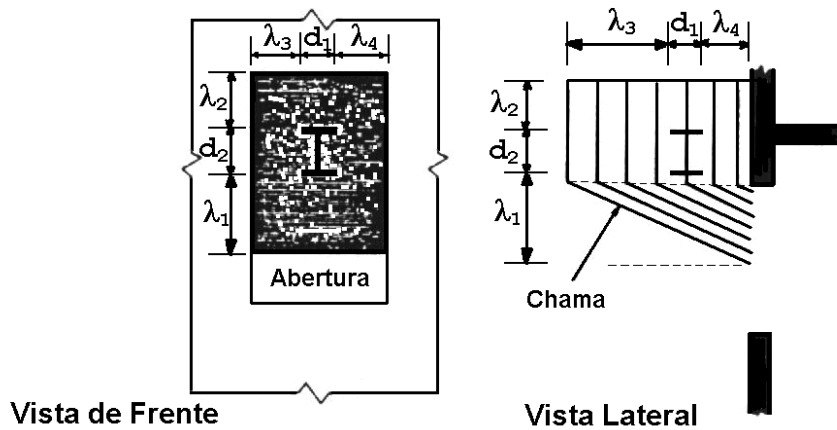
Para a face 1 da viga, utiliza-se a equação A.53.

- Para a viga paralela à parede e imediatamente adjacente à ela, conforme mostra a figura A.15(b)(2), deve-se utilizar as seguintes equações:

$$I_{z,2} = \phi_{z,2} C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma (T_{z,2} + 273,15)^4 \quad (\text{A. 63})$$

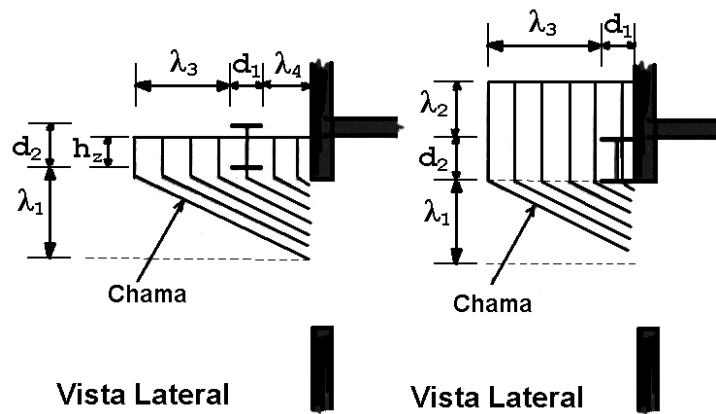
$$I_{z,3} = \phi_{z,3} C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma \left[ (T_{z,1} + 273,15)^4 + (T_{z,2} + 273,15)^4 \right] / 2 \quad (\text{A. 64})$$

$$I_{z,4} = 0 \quad (\text{A. 65})$$



1) Viga perpendicular à parede

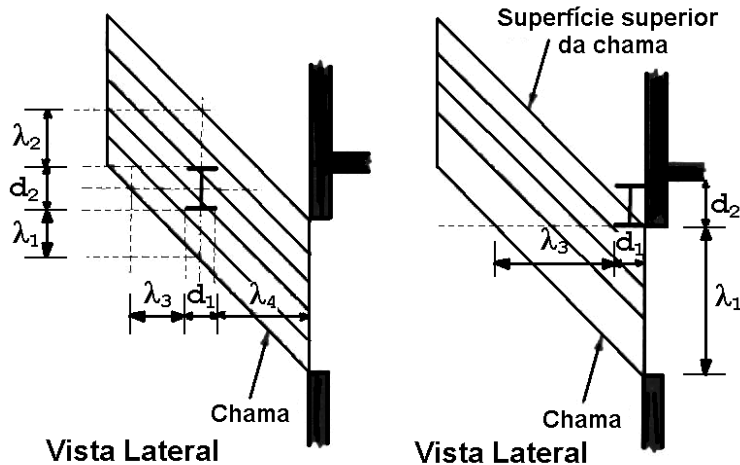
2) Viga paralela à parede



3) Topo da chama abaixo do topo da viga

4) Viga imediatamente adjacente à parede

a) "Sem Ventilação Forçada"



1) Viga não adjacente à parede

2) Viga imediatamente adjacente à parede

b) "Ventilação Forçada"

Figura A.15: Viga envolvida em chamas



### A.3.2.3 Convecção das Chamas e Gases Quentes

Para a situação de ventilação natural, calcula-se  $\alpha_z$  através da equação A.49 e sob condições de ventilação forçada, a partir da equação A.50.

### A.3.2.4 Absortividade das Chamas

- Para pilares envolvidos em chamas:

$$a_z = \frac{\varepsilon_{z,1} + \varepsilon_{z,2} + \varepsilon_{z,3}}{3} \quad (\text{A.66})$$

onde:

$\varepsilon_{z,1}$ ,  $\varepsilon_{z,2}$  e  $\varepsilon_{z,3}$  = emissividades da chama para as faces 1, 2 e 3 do pilar.

- Para vigas completamente ou parcialmente envolvidas em chamas:

$$a_z = 1 - e^{-0,3h} \quad (\text{A.67})$$

## A.4 FATOR DE CONFIGURAÇÃO

Determina-se o valor do fator de configuração em um ponto central, P, conforme a figura A.16.

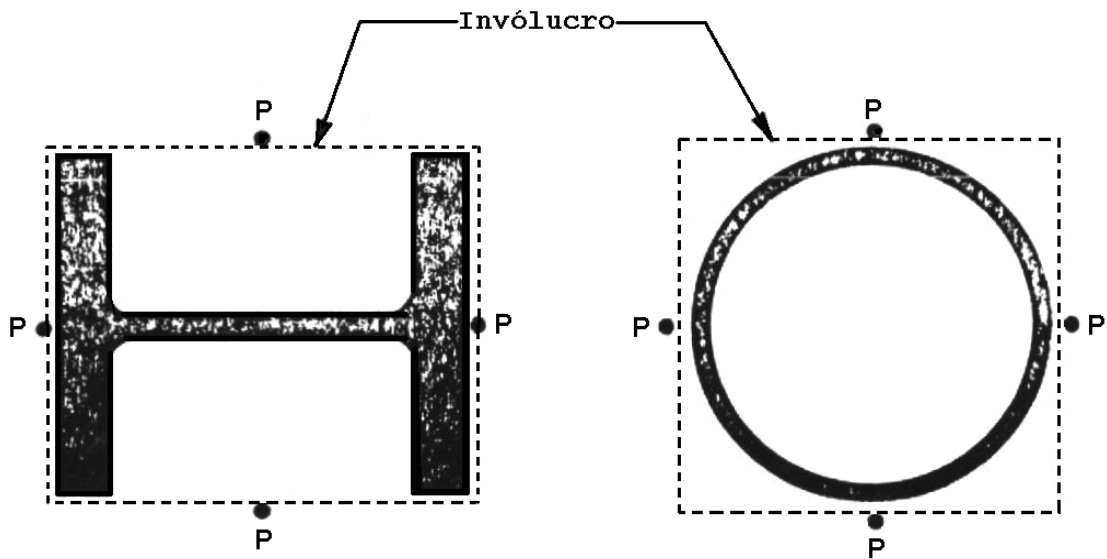


Figura A.16: Invólucro ao redor das superfícies receptoras

Calcula-se, então, os valores de  $a$  e  $b$  para cada face da peça:

$$\left. \begin{aligned} a &= h' / S' \\ b &= \omega' / S' \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 68})$$

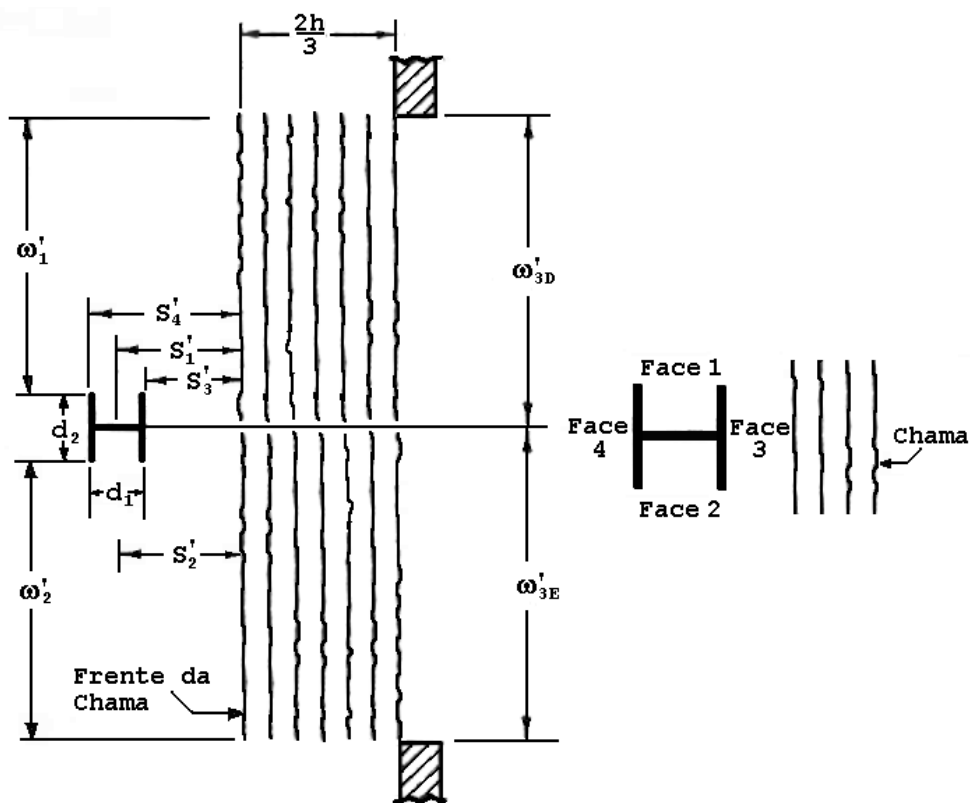
onde:

$S'$  = distância de  $P$  até  $X$ ;

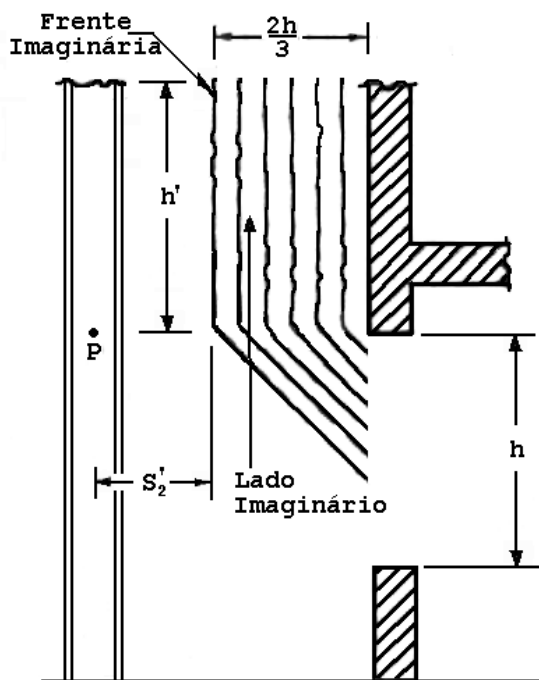
$h'$  = altura da região na superfície irradiante;

$\omega'$  = largura da região irradiante.

Os parâmetros da equação A.68, para o cálculo do fator de configuração, são observados nas figuras A.17, A.18, A.19, A.20 e A.21, considerando-se cada caso em particular.

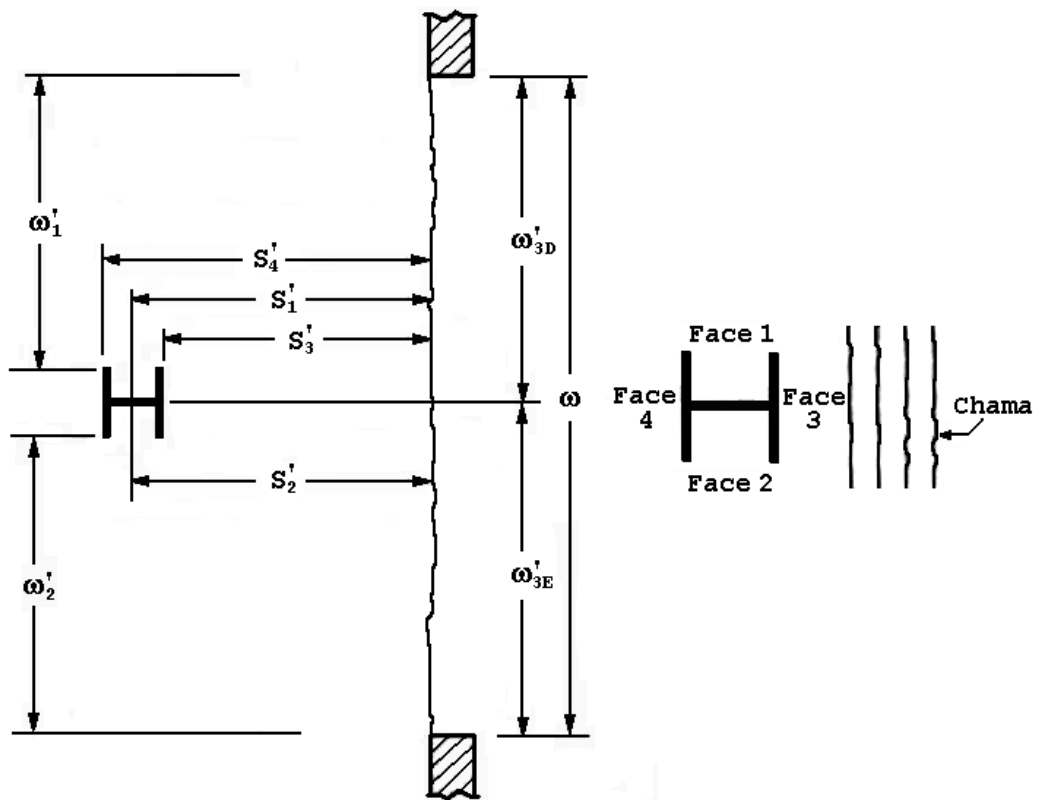


Vista de Cima

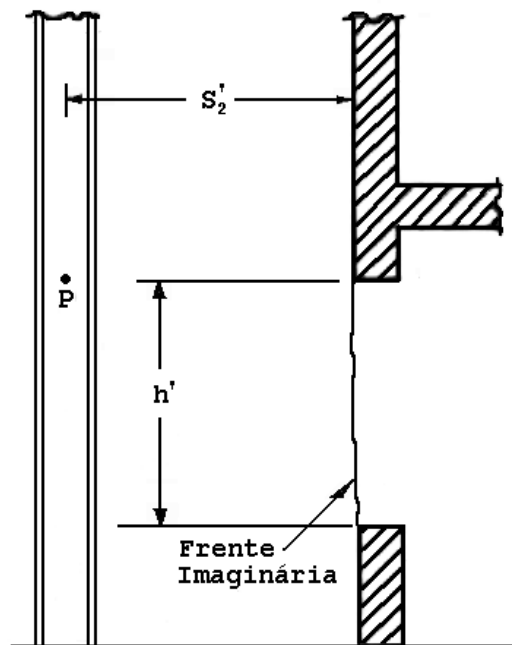


Vista Lateral

Figura A.17: Localização e dimensões do pilar, ao considerá-lo em frente à janela, para todas as condições de ventilação, sendo a chama como superfície irradiante

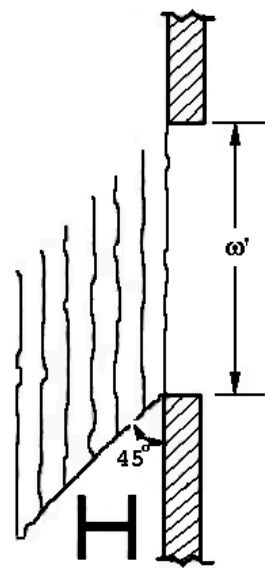


Vista de Cima

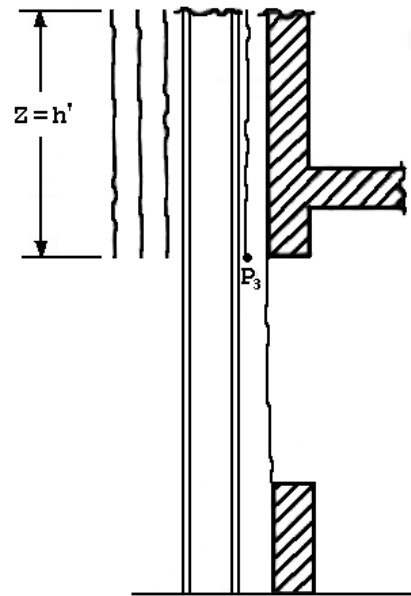


Vista Lateral

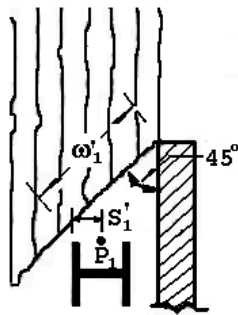
Figura A.18: Localização e dimensões do pilar, ao considerá-lo em frente à janela, para todas as condições de ventilação, sendo a janela como superfície irradiante



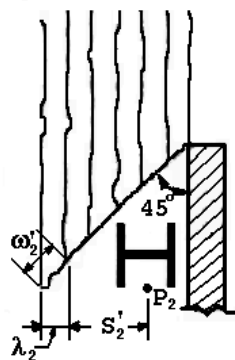
Vista de Cima



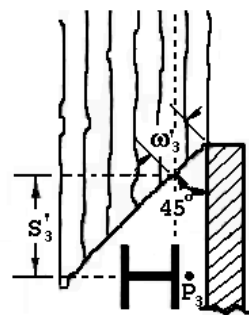
Vista Lateral  
Detalhe A



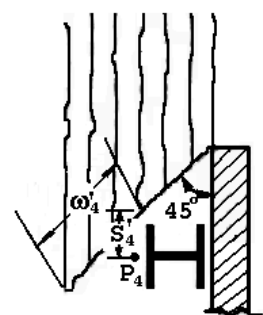
Vista de Cima  
Detalhe B



Vista de Cima  
Detalhe C



Vista de Cima  
Detalhe D



Vista de Cima  
Detalhe E

Figura A.19: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela, com ventilação natural e a chama estimada como superfície irradiante

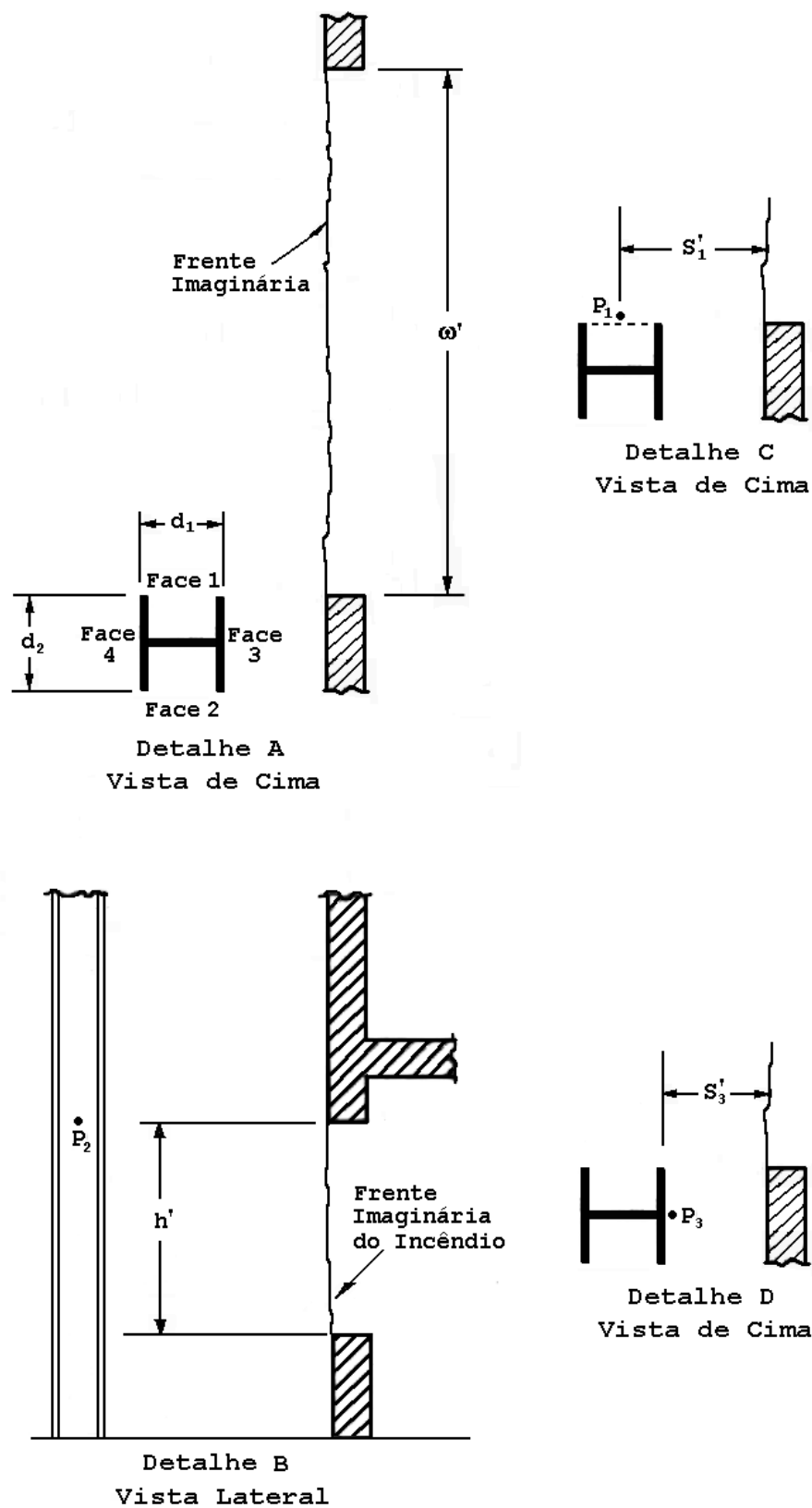


Figura A.20: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela e a janela como superfície irradiante

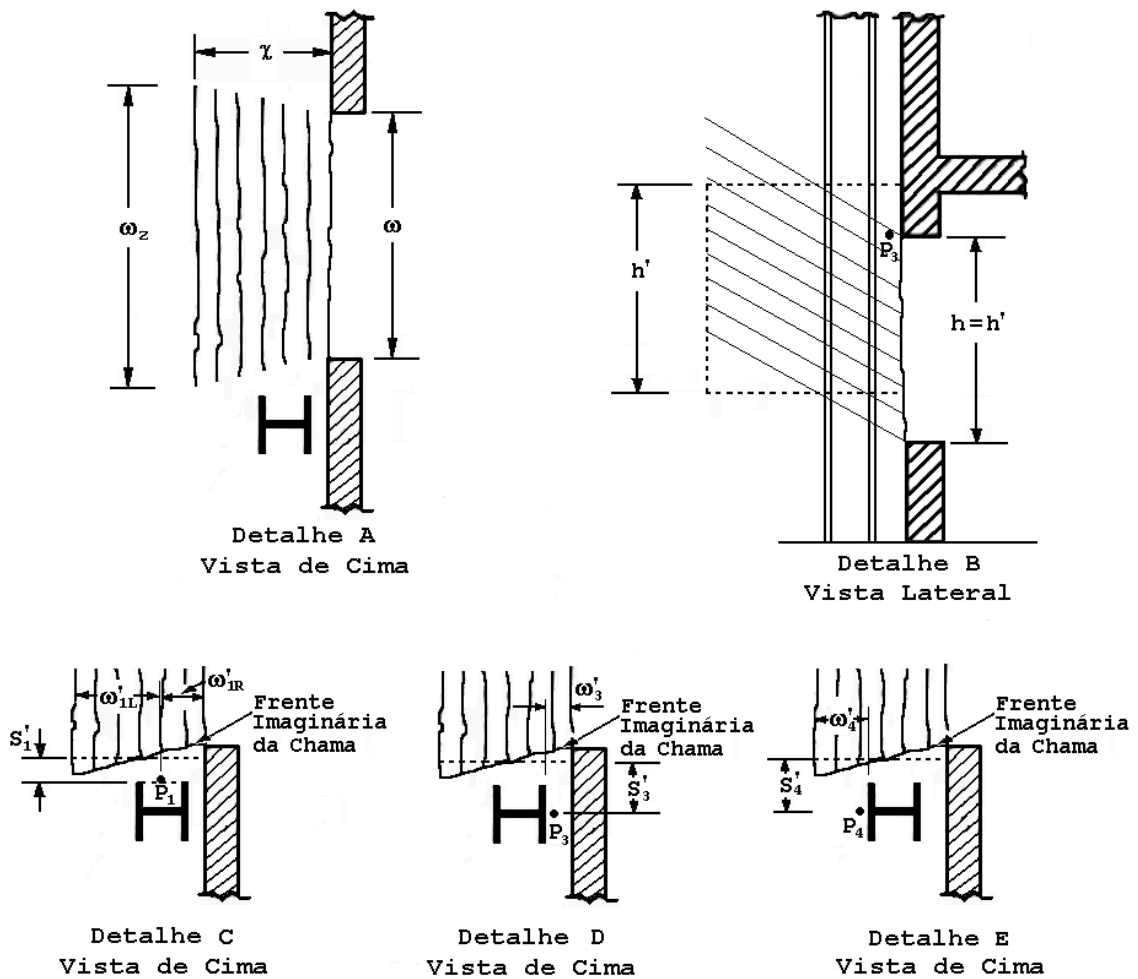


Figura A.21: Localização e definição das faces do pilar, tendo em vista o pilar ao lado da janela, com ventilação forçada e a chama como superfície irradiante

Conhecendo-se os valores dos parâmetros  $a$  e  $b$ , calcula-se, então, a contribuição de cada uma das regiões da superfície irradiante, as quais são visíveis a partir do ponto  $P$  (figura A.16), na superfície receptora. Determina-se a contribuição de cada região conforme uma das três situações a seguir:

1ª Situação: superfície receptora paralela à superfície irradiante, de acordo com a figura A.22:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{a}{(1+a^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{b}{(1+a^2)^{0,5}} \right] + \frac{b}{(1+b^2)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{a}{(1+b^2)^{0,5}} \right] \right\} \quad (\text{A. 69})$$

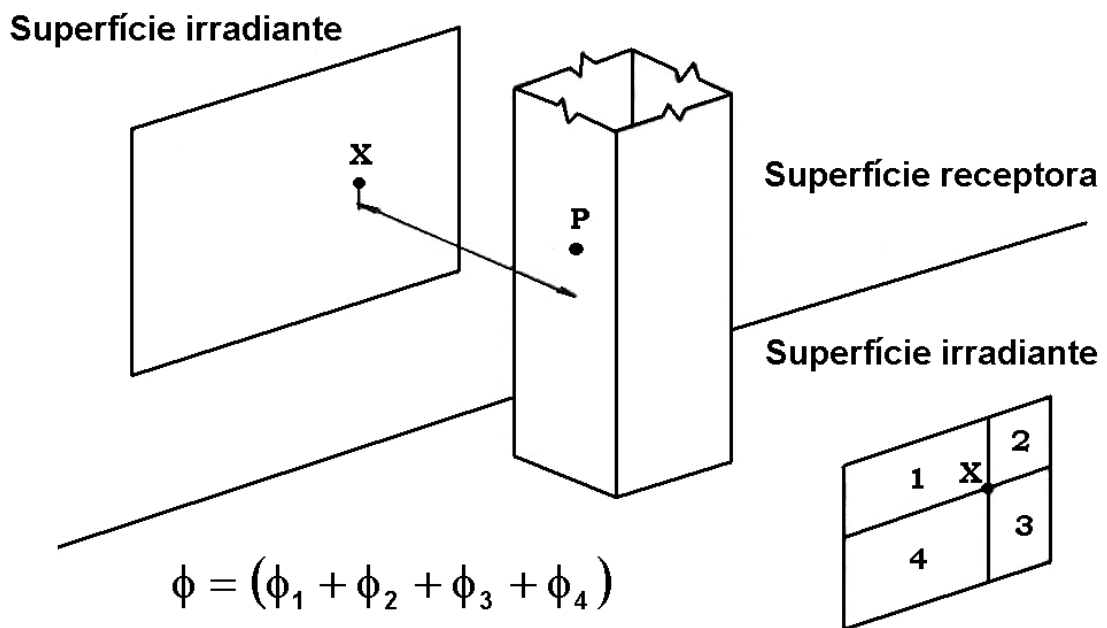


Figura A.22: Superfície receptora em um plano paralelo ao plano da superfície irradiante

2ª Situação: superfície receptora perpendicular à superfície irradiante, conforme ilustra a figura A.23:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left\{ \tan^{-1}(a) - \frac{1}{(1+b^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left[ \frac{a}{(1+b^2)^{0,5}} \right] \right\} \quad (\text{A. 70})$$



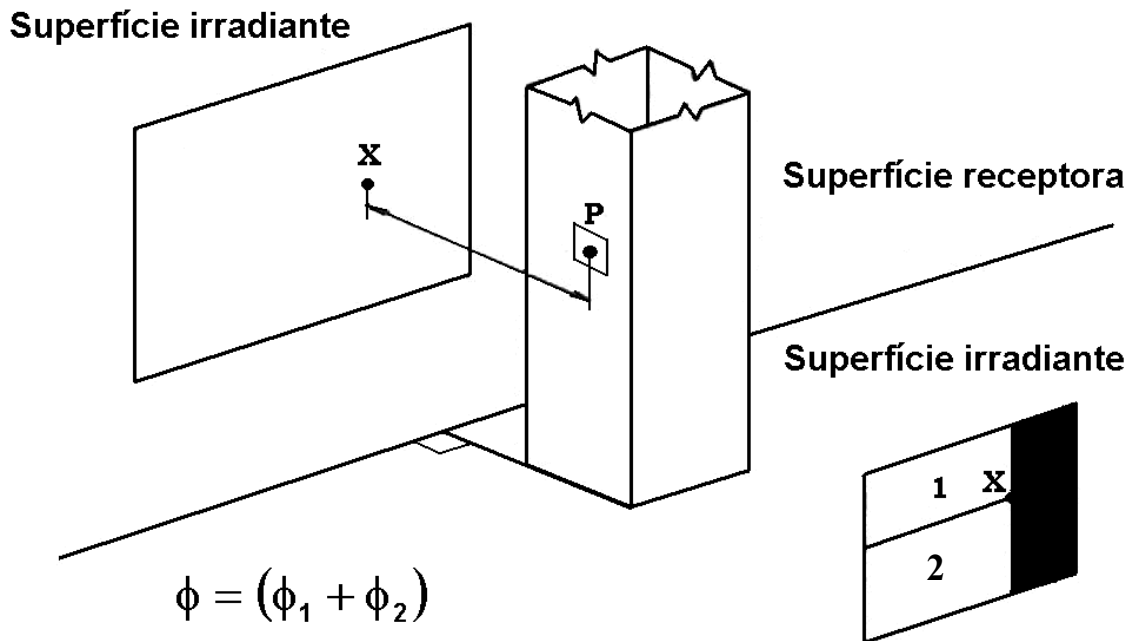


Figura A.23: Superfície receptora perpendicular ao plano da superfície irradiante

3ª Situação: superfície receptora em um plano que forma um ângulo  $\theta$  com a superfície irradiante, de acordo com a figura A.24:

$$\begin{aligned}
 \phi = \frac{1}{2\pi} & \left\langle \operatorname{tag}^{-1}(a) - \frac{(1 - b \cos \theta)}{(1 + b^2 - 2b \cos \theta)^{0,5}} \operatorname{tag}^{-1} \times \right. \\
 & \times \left[ \frac{a}{(1 + b^2 - 2b \cos \theta)^{0,5}} \right] + \frac{a \cos \theta}{(a^2 + \operatorname{sen}^2 \theta)^{0,5}} \times \\
 & \left. \times \left\{ \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{(b - \cos \theta)}{(a^2 + \operatorname{sen}^2 \theta)^{0,5}} \right] + \operatorname{tag}^{-1} \left[ \frac{\cos \theta}{(a^2 + \operatorname{sen}^2 \theta)^{0,5}} \right] \right\} \right\rangle \quad (\text{A.71})
 \end{aligned}$$

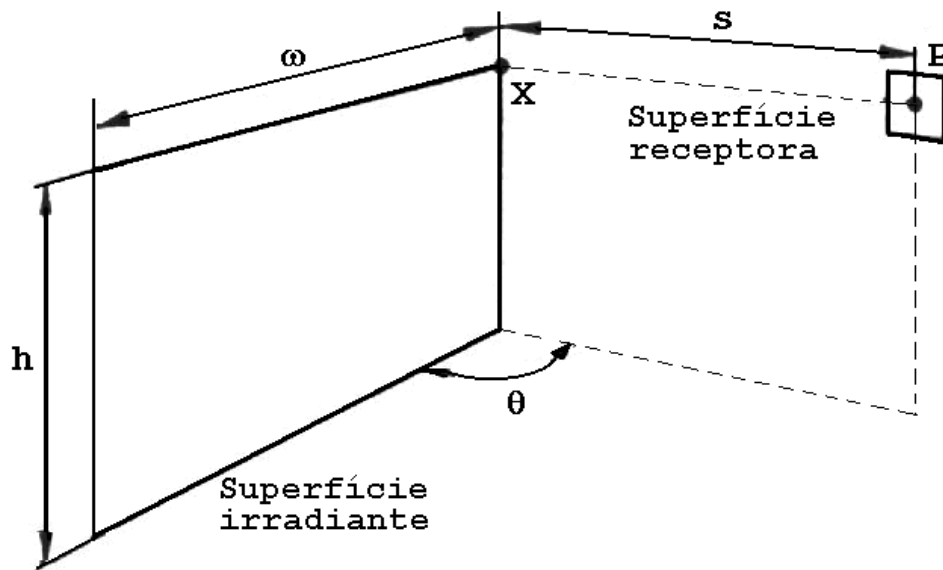


Figura A.24: Superfície receptora em um plano de ângulo  $\theta$  com relação ao plano da superfície irradiante

#### A.5 FATOR DE CONFIGURAÇÃO TOTAL

Tendo-se transferência de calor por radiação proveniente da abertura, calcula-se o  $\phi_f$  da peça a partir da equação A.72:

$$\phi_f = \frac{(C_1\phi_{f,1} + C_2\phi_{f,2})d_1 + (C_3\phi_{f,3} + C_4\phi_{f,4})d_2}{(C_1 + C_2)d_1 + (C_3 + C_4)d_2} \quad (\text{A.72})$$

onde:

$\phi_{f,j}$  = fator de configuração da face  $j$  da peça para a abertura, conforme o item A.4;

$d_j$  = dimensão da seção transversal da face  $j$  da peça;

$C_j$  = coeficiente de proteção da face  $j$  da peça, sendo que para uma face protegida  $C_j = 0$  e para uma face desprotegida  $C_j = 1$ .

Considerando-se transferência de calor por radiação proveniente das chamas, determina-se o  $\phi_z$  da peça como a seguir:

$$\phi_z = \frac{(C_1\phi_{z,1} + C_2\phi_{z,2})d_1 + (C_3\phi_{z,3} + C_4\phi_{z,4})d_2}{(C_1 + C_2)d_1 + (C_3 + C_4)d_2} \quad (\text{A.73})$$

onde:

$\phi_{z,j}$  = fator de configuração da face  $j$  da peça para a chama, de acordo com o item A.4.