

PCC
D. 24.10

UBIRACI ESPINELLI LEMES DE SOUZA

Eng. Civil, Escola Politécnica da USP, 1983

**A UTILIZAÇÃO DA
LAJE COMPOSTA NA
CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da USP
para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Vahan Agopyan

Depto Engenharia de Construção Civil

São Paulo, 1989

FD-1060

DEDICATÓRIA

A cinco pessoas que, se talvez entendam muito pouco sobre o tema deste trabalho, com certeza são referências para a minha vida:

Ubirajara,
Lázara,
Inara,
Anai e
Márcia.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho se insere dentro da linha de atuação do Núcleo de Tecnologia da Construção Metálica - NTCM, do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, cabendo inicialmente os agradecimentos ao grande apoio recebido dos colegas deste grupo.

Inúmeras foram as contribuições para este estudo, ficando aqui um agradecimento geral a todas elas, já que não seria possível listá-las completamente. Gostaria, no entanto, de me congratular com algumas pessoas que tiveram papel decisivo neste trabalho: Prof. Dr. Vahan Agopyan, sempre disponível e atento para todos os questionamentos de seu orientando; Prof. Francisco Ferreira Cardoso, presente nestes meus estudos desde seu início e, poderia dizer, co-autor dos três capítulos iniciais; Prof. Silvio Burratino Melhado, também co-autor no que se refere à proteção contra o fogo; Eng^o Rosa Maria Messaros, na sua incansável colaboração na revisão e confecção do trabalho final.

Agradeço em especial ainda: ao Eng^o Celso Gnecco, pelas discussões quanto ao problema da corrosão; ao Prof. Fernando Henrique Sabbatini, pelo constante incentivo à minha atuação como engenheiro; ao Prof. Dr. Francisco Romeu Landi e Prof. Dr. Orestes Marracini Gonçalves, pela orientação em minha atuação acadêmica; à Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA e à Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia - FDTE, pela viabilização de pesquisas sobre a laje composta; à Cida, Luciana e Roberto, pela dedicação e paciência com a datilografia deste trabalho; ao engenheiro Carlos, pelo capricho nos desenhos do mesmo; ao Paulo, pelo capricho nas cópias.

Agradeço finalmente a Deus, pela sorte de ter tantos amigos colaborando para que eu pudesse transmitir algo de útil neste trabalho.

INDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
2 A LAJE COMPOSTA NO CONTEXTO DA CONSTRUÇÃO CIVIL ...	4
2.1 O USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	4
2.2 O USO DA CHAPA DE AÇO DOBRADA NA CONFECÇÃO DE LAJES DE PISO EM ASSOCIAÇÃO COM CONCRETO	8
2.2.1 Chapa Dobrada como único Componente Resistente do Piso	9
2.2.2 Chapa Dobrada com a única Função de Forma Perdida	10
2.2.3 Chapa Dobrada com a Função de Forma e Função Estrutural na Laje Final Obtida	12
2.3 A LAJE COMPOSTA: TERMINOLOGIA E HISTÓRICO	13
2.4 A CONCEPÇÃO E CONSTITUINTES DA LAJE COMPOSTA .	15
2.4.1 Considerações Preliminares Quanto à Concepção	15
2.4.2 Constituintes da Laje Composta	24
2.5 PANORAMA ATUAL E PERSPECTIVAS DE UTILIZAÇÃO EM SUBSTITUIÇÃO AO PROCESSO CONVENCIONAL	30
3 A EXECUÇÃO DA LAJE COMPOSTA	34
3.1 TRANSPORTE	35

3.2	ESTOCAGEM	38
3.3	IÇAMENTO	39
3.4	CIMBRAMENTO	40
3.5	DEPOSIÇÃO E MONTAGEM	46
3.6	SOLDAGEM	56
3.7	ARMAÇO	57
3.8	CONCRETAGEM E CURA	59
3.9	CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES QUANTO A EXECUÇÃO	63
3.9.1	Equipamentos	63
3.9.2	Mão-de-Obra	64
3.9.3	Prazos de Execução da Laje	64
3.10	INTERAÇÃO COM OS DEMAIS SUBSISTEMAS DO EDIFÍCIO	65
3.10.1	Estrutura	65
3.10.2	Vedações Verticais e Horizontais ...	66
3.10.3	Instalações Hidráulicas, Elétricas e de Ar Condicionado	68
3.10.4	Acabamentos e Proteções	69
4	A PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO	70
4.1	O FENÔMENO DA CORROSÃO	71
4.1.1	Corrosão Eletroquímica	72
4.1.2	A Corrosão Eletroquímica do Aço	77

4.1.3	O Estabelecimento do Processo Corrosivo	79
4.1.4	Classificação do Processo Corrosivo ...	86
4.1.5	Mecanismos de Proteção Contra a Corrosão	91
4.2	A CORROÇÃO DA LAJE COMPOSTA	92
4.2.1	A Face Superior da Chapa	92
4.2.2	A Face Inferior da Chapa	100
4.3	PRINCÍPIOS DA CONSECUÇÃO DE SEGURANÇA	103
4.3.1	O Projeto como Agente de Controle da Corrosão	103
4.3.2	A Utilização de Aços Resistentes à Corrosão	112
4.3.3	A Proteção pelo Uso do Zinco	133
4.3.4	A Proteção pela Pintura	148
5	A PROTEÇÃO CONTRA FOGO	150
5.1	O FENÔMENO DO INCÊNDIO	151
5.1.1	Uma Visão Analítica	152
5.1.2	Caracterização da Ocorrência	155
5.1.3	Duração e Severidade	158
5.1.4	Princípios da Consecução de Segurança ..	175
5.2	A SEGURANÇA DA LAJE COMPOSTA QUANTO AO FOGO ..	176
5.2.1	Exigências de Resistência ao Fogo para Lajes de Piso	177
5.2.2	Recomendações Quanto às Lajes Compostas	188

5.3	A PROTEÇÃO PASSIVA COM MATERIAIS DISPONÍVEIS NO MERCADO NACIONAL	239
5.3.1	"Eucatex"	239
5.3.2	"Fibras Cerâmicas"	240
5.3.3	"Gypsalum"	243
5.3.4	"Gypsum"	244
5.3.5	"Minebra"	247
5.3.6	"Sumaré"	249
6	COMPARAÇÃO ESTIMATIVA DE CUSTO	253
6.1	SISTEMAS DE PISO DISPONÍVEIS NO MERCADO NACIONAL	253
6.2	A LAJE COMPOSTA COMO OPÇÃO PARA O SISTEMA DE PISO	257
7	COMENTÁRIOS FINAIS	262
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	263
	ANEXO	272

RESUMO

Este trabalho apresenta a laje composta como uma opção para a execução dos pisos de edifícios de múltiplos andares. Em se tratando de um produto não convencional em nosso país, passa-se inicialmente por uma conceituação e análise das possibilidades mercadológicas do mesmo. Discutem-se, posteriormente, as técnicas de execução, a proteção contra a corrosão e o fogo, e a viabilidade econômica deste tipo de laje.

ABSTRACT

This dissertation introduces the steel deck reinforced slab as an option for the execution of multi-storey buildings. As it is not a conventional product in our community we established firstly its definition and marketing possibilities. Later, its is discussed the execution technics, corrosion and fire protection, and economic viability of this sort of slab.

1. INTRODUÇÃO

A laje composta concreto-chapa de aço dobrada representa uma alternativa para a execução de lajes para edifícios que foi até hoje bem pouco explorada no Brasil.

Trata-se de um elemento estrutural onde uma chapa de aço dobrada faz o papel inicial de fôrma para o concreto fresco sobre ela lançado e que, após o endurecimento deste e garantido o trabalho solidário concreto-aço, passa a atuar como armadura de flexão da estrutura mista obtida (Figura 1.1).

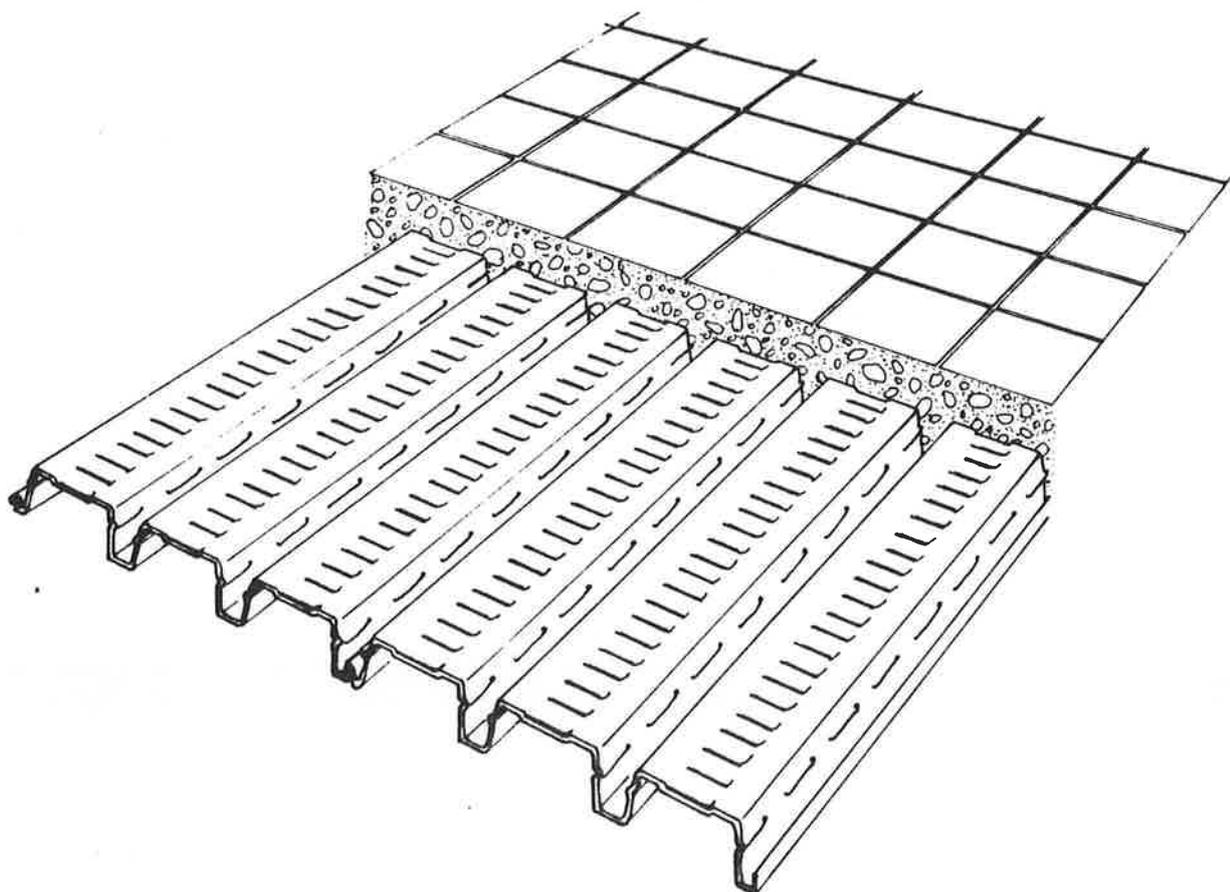


Figura 1.1 - Ilustração genérica de uma laje composta concreto - chapa de aço dobrada. (1)

O estudo a respeito das lajes compostas, que ora se apresenta, constitui-se no primeiro trabalho de pós-graduação realizado nesta Escola dentro do tópico de pesquisa "Construções Metálicas", inserido na linha de pesquisa "Tecnologia de Processos Construtivos", onde a expressão "Construções Metálicas" abrange os processos construtivos que façam uso do material aço de maneiras diferentes das representadas pelos vergalhões para concreto armado e protendido.

Dentro deste contexto, o trabalho é desenvolvido sob uma visão bastante ampla, preocupando-se por exemplo com a análise da disponibilidade de matéria-prima para a adoção deste tipo de laje, e dando ênfase a três aspectos que sempre fazem parte das discussões quanto ao uso do aço na construção: a falta de tradição construtiva, a ocorrência de corrosão do material e a sua segurança contra o fogo.

Dentro deste enfoque abrangente, o trabalho se desenvolve na seguinte seqüência:

- análise das perspectivas de utilização do aço na construção civil;
- levantamento das possibilidades de utilização das chapas de aço para confecção de lajes;
- discussão quanto à nomenclatura utilizada para a laje composta ora em estudo;
- análise das perspectivas mercadológicas do produto;
- discussão de aspectos relativos à sua concepção estrutural;
- descrição do processo de execução da laje composta inserido na construção do edifício;
- análise do problema, e proposição de soluções existentes no mercado nacional, para incrementar a durabilidade da laje composta frente às seguintes solicitações: corrosão do aço e ocorrência de incêndio;
- comparação econômico-executiva com o processo tradicional de execução de lajes convencionais de concreto armado.

Trabalhos posteriores procurarão desenvolver especificamente os problemas aqui comentados.

Cabe ainda salientar a importância deste assunto na otimização do processo construtivo. "Existe hoje em dia um direcionamento do desenvolvimento da construção civil brasileira no sentido de sua racionalização, buscando com

isso soluções mais eficientes e econômicas" (2); o desenvolvimento deste trabalho procura caminhar dentro deste enfoque. Mais que isto, a pesquisa tecnológica na área da construção de edifícios tem muitas vezes relegado as lajes a um segundo plano: quando se fala em estruturas de aço pensa-se efetivamente em pilares e vigas; a alvenaria estrutural - armada ou não-armada - apresenta-se como alternativa para substituição destes mesmos dois componentes estruturais.

Enfim, neste trabalho, as lajes são enfocadas a nível de um sub-sistema do edifício, cabendo a observação de que muitos dos sistemas construtivos inovadores hoje em implantação poderão ser viabilizados pela adoção de lajes adequadas.

2. A LAJE COMPOSTA NO CONTEXTO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Na medida em que se propõe a utilização de um sistema não convencional para a construção de edifícios, é conveniente não se perder de vista a abrangência da posição que o mesmo pode ocupar dentro do mercado. É neste sentido que passa-se a analisar a laje composta como uma das formas através das quais se pode utilizar a chapa de aço dobrada na confecção de lajes, bem como se discute um pouco a respeito de suas perspectivas dentro do panorama vigente. Passa-se ainda por alguns comentários quanto à concepção do componente, a denominação adotada bem como pelo histórico de utilização do produto a nível nacional e internacional.

2.1 O USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O Brasil ocupa hoje uma posição de destaque no cenário da produção mundial de aço; na Tabela 2.1, extraída de estatísticas realizadas pelo "Consider" (3), já se vislumbra a 7ª colocação, sendo que essa contribuição, dentro do panorama vigente, promete ser cada vez mais significativa: Claret (4) enfatiza que "a liderança na produção mundial de aço deverá ser disputada entre o Brasil, Coréia do Sul e Formosa, sendo que possuímos condições bastante mais favoráveis para assumir este posto".

A utilização deste material, no entanto, está muito aquém da relevância dos números mostrados quanto à produção. O consumo "per capita" brasileiro não alcança a quarta parte dos índices verificados nos principais países desenvolvidos, que são da ordem de 400 a 500 kg/hab/ano (5).

No que tange à construção civil a situação é ainda mais incipiente. Do relatório anual da "Associação Brasileira da Construção Metálica - ABCEM" referente a 1986 (6), pode-se extrair os dados constantes da Tabela 2.2, observando-se ainda que a capacidade instalada indicada neste mesmo documento é de 612.000 ton/ano.

CLASSIFICAÇÃO	PAÍSES	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1986 x
1	URSS	147,9	148,5	147,2	152,5	154,2	154,5	160,0	22,4
2	Japão	111,4	101,7	99,5	97,2	105,6	105,3	98,3	13,8
3	Estados Unidos	101,5	109,6	67,6	76,8	83,9	80,1	73,8	10,3
4	China	37,1	35,6	37,1	40,0	43,4	46,7	51,9	7,3
5	Alemanha Ocidental	43,8	41,6	35,9	35,7	39,4	40,5	37,1	5,2
6	Itália	26,5	24,8	24,0	21,8	24,1	23,9	22,9	3,2
7	Brasil	15,3	13,2	13,0	14,7	18,4	20,5	21,2	3,0
8	França	23,2	21,3	18,4	17,6	19,0	18,8	17,9	2,5
9	Polônia	19,5	15,7	14,8	16,2	16,5	15,8	17,4	2,4
10	Tchecoslováquia	14,9	15,3	15,0	15,0	14,8	15,0	15,3	2,1
11	Reino Unido	11,3	15,6	13,7	15,0	15,1	15,7	14,8	2,1
12	Coreia do Sul	8,6	10,8	11,8	11,9	13,0	13,5	14,6	2,0
13	Canadá	15,9	14,8	11,9	12,8	14,7	14,6	14,1	2,0
14	Romênia	13,2	13,0	13,1	12,6	14,4	13,8	13,8	1,9
15	Espanha	12,5	12,9	13,1	13,0	13,5	14,2	12,0	1,7
16	Índia	9,5	10,8	11,0	10,2	10,5	11,5	11,9	1,7
17	Bélgica	12,4	12,4	10,0	10,2	11,3	10,7	9,7	1,4
18	África do Sul	9,1	9,0	8,2	7,0	7,7	8,5	9,1	1,3
19	Coreia do Norte	5,8	5,5	5,8	6,1	6,5	8,4	9,0	1,3
20	Alemanha Oriental	7,3	7,5	7,2	7,2	7,6	7,9	7,9	1,1
21	México	7,1	7,6	7,1	6,9	7,5	7,3	7,1	1,0
22	Austrália	7,6	7,6	6,4	5,6	6,3	6,6	6,7	0,9
23	Turquia	2,5	2,4	2,8	3,8	4,3	5,0	6,0	0,8
24	Países Baixos	5,3	5,5	4,4	4,5	5,7	5,5	5,3	0,7
25	Lugoslávia	3,6	4,0	3,8	4,1	4,2	4,5	5,3	0,7
26	Formosa	3,4	3,2	4,2	5,0	5,0	5,1	5,2	0,7
27	Suécia	4,2	3,8	3,9	4,2	4,7	4,8	4,7	0,7
28	Áustria	4,6	4,7	4,3	4,4	4,9	4,7	4,3	0,6
29	Hungria	3,8	3,6	3,7	3,6	3,8	3,6	3,8	0,5
30	Luxemburgo	4,6	3,8	3,5	3,3	4,0	3,9	3,7	0,5
31	Venezuela	2,1	2,0	2,2	2,3	2,9	3,0	3,5	0,5
32	Argentina	2,7	2,6	2,9	2,9	2,6	2,9	3,2	0,5
33	Bulgária	2,6	2,5	2,6	2,8	2,8	2,9	2,9	0,4
34	Finlândia	2,5	2,4	2,4	2,4	2,6	2,5	2,6	0,4
35	Outros Países	12,8	12,4	12,3	14,0	15,0	16,9	17,2	2,4
TOTAL		716,2	707,7	644,8	663,3	709,9	719,1	714,2	100,0

Tabela 2.1 - Produção mundial de aço bruto. (3)

Tabela 2.2 - Produção estimada dos associados da "ABCEM", por tipo de estrutura, no ano de 1986. (6)

TIPO DE ESTRUTURA	PRODUÇÃO ANUAL (ton)
Edifícios de múltiplos andares	1.563
Edifícios industriais, galpões, armazéns, hangares	39.378
Plataformas de exploração de petróleo "off-shore"	16.925
Pontes, viadutos e passarelas	8.452
Torres de transmissão de energia e subestações	28.720
Torres de outros tipos	18.800
Calderaria em geral	7.739
Coberturas e fechamentos	33.924
Perfis dobrados para terceiros	12.300
Perfis soldados para terceiros	12.874
Diversas	59.993
TOTAL GERAL	240.668

Estimando-se as contribuições de algumas empresas associadas que não encaminharam dados informativos até o fechamento do relatório, ter-se-á ainda uma ociosidade da capacidade instalada de 40% a 50%. Mais que isto, na hipótese de ociosidade de 40%, bem como de que toda esta produção fosse relativa à construção civil (observe-se a presença de um item referente a calderaria nos dados indicados anteriormente), ter-se-ia a fabricação de 367.200 ton em 1986, o que representa 1,7% da produção brasileira de aço neste mesmo ano, índice extremamente baixo em relação ao verificado em inúmeros países desenvolvidos, cujo consumo médio, segundo Bellei (7), atinge 12 a 18 kg/habitante/ano. Se, dentro do mesmo raciocínio, analisar-se a fabricação de edifícios de múltiplos andares, a participação na utilização do aço fabricado é totalmente desprezível.

A expressiva predominância da utilização do concreto em relação ao aço na construção civil brasileira possui raízes históricas; as condições determinantes deste panorama, porém, encontram-se bastante modificadas atualmente (8).

O cimento é um material abundante no mercado da construção há muitos anos; em 1943 o Brasil já conseguiu suprir praticamente toda a demanda deste setor (9). Quanto ao aço, apesar das altas taxas de 1986, até bem pouco tempo importava-se boa parte do montante consumido (Tabela 2.3), não havendo sentido em se incentivar a utilização do mesmo na construção civil; esta situação hoje está totalmente modificada (Tabela 2.4), sendo o país um grande exportador de aço.

Tabela 2.3 - Evolução do consumo interno e das importações de aço. (5)

ANOS	CONSUMO INTERNO (ton)	IMPORTAÇÕES (ton)	PARTICIPAÇÃO DAS IMPORTAÇÕES NO ABASTECIMENTO INTERNO (%)
1974	9.841	4.014	42
1975	8.932	2.549	28
1976	8.281	1.142	14
1977	9.386	949	10
1978	9.869	728	7
1979	10.717	549	5
1980	12.174	647	5
1981	9.851	609	6
1982	9.278	231	2
1983	7.641	86	1

Tabela 2.4 - Balança comercial de produtos siderúrgicos. (3)

ANO	EXCEDENTE DE EXPORTAÇÃO EM RELAÇÃO A IMPORTAÇÃO (ton)
1977	(571.511)
1978	205.792
1979	897.936
1980	850.444
1981	976.411
1982	1.975.590
1983	5.062.498
1984	6.361.124
1985	7.006.174
1986	5.615.555

2.2 O USO DA CHAPA DE AÇO DOBRADA NA CONFECÇÃO DE LAJES DE PISO EM ASSOCIAÇÃO COM CONCRETO

A norma inglesa relativa ao projeto de pisos que façam uso de chapas de aço dobradas em associação com concreto (10) prevê duas possibilidades para o funcionamento estrutural do componente na sua fase de utilização:

- o funcionamento como uma estrutura mista, oriundo de um trabalho solidário entre a chapa de aço e o concreto;
- o funcionamento como uma estrutura onde apenas um dos constituintes é considerado como responsável na resistência às cargas permanentes e acidentais: a chapa de aço ou o concreto armado com barras de aço adicionais.

No decorrer deste trabalho acumulou-se uma série de catálogos técnicos de fabricantes ligados ao setor (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19), os quais estão reunidos na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Fabricantes, produtos e perfis constantes dos catálogos técnicos analisados neste trabalho. (20)

Fabricante	País	Produtos	Perfis
PMF	Inglaterra	Laje composta	CF 46
PAB	França	Fôrma p/Laje	TOITESCO LS
		Laje composta	COFRASMA 40 COFRASMA 70
PE-VA	Filândia	Laje composta	PEVA 45
PERKRON	Brasil	Laje composta	PERKRON
Nittetsu	Japão	Piso Estrutural	Deck Plate
		Fôrma p/ Laje	Diversos
			Piso Racional
			Painel para Piso
Laje composta	Linha E (EV50, EUA)		
	Linha Super (EZ50, EZ75)		

Da análise destes catálogos encontram-se basicamente três utilizações distintas da chapa dobrada em conjunto com o concreto, compatíveis com as possibilidades previstas pela "BS 5950 - Part 4" anteriormente citada. Passa-se à descrição dessas utilizações.

2.2.1 Chapa Dobrada como Único Componente Resistente do Piso

A "Nittetsu" oferece o denominado "Piso Estrutural" (Figura 2.1), que consiste na construção de um piso onde somente a chapa de aço dobrada atua como elemento resistente; observe-se que o material moldado sobre a chapa não é considerado com função estrutural para efeito de dimensionamento.

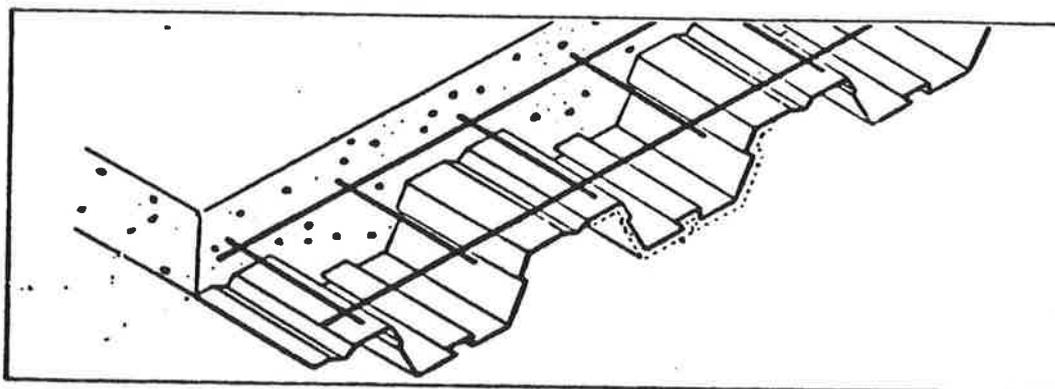


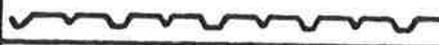
Figura 2.1 - Piso estrutural (Nittetsu). (11)

O concreto cumpre a função de propiciar uma superfície mais adequada para utilização, bem como favorece uma melhor distribuição de cargas concentradas para a chapa; a existência desse "cobrimento" de concreto acaba melhorando o funcionamento da própria chapa dobrada, existindo comprovações experimentais de incrementos significativos quanto à resistência e à rigidez comparados com o desempenho da chapa dobrada simples (21).

2.2.2 Chapa Dobrada com a Única Função de Forma Perdida

A "PAB" e a "Nittetsu" oferecem chapas de aço dobradas para servirem de molde perdido para lajes de concreto armado; algumas características dos perfis disponíveis são indicadas nas Tabelas 2.6 e 2.7.

Tabela 2.6 - Produtos da "PAB": forma para laje. (16)

PERFIL	ALTURA (mm)	ESPESSURA (mm)	PESO/ÁREA (Kg/m ²)
 TOITESCO C 10S	25	0,75	6,74
		1,00	8,99
 TOITESCO C 30S	32	0,75	7,18
		1,00	9,57
 TOITESCO C 40S	41	0,75	7,48
		1,00	9,97
NÃO DISPONÍVEL TOITESCO C 50S	—	—	—
 TOITESCO C 60S	59	0,75	8,37
		1,00	11,16
 TOITESCO C 80S	66	0,75	9,68
		1,00	12,91
 LS 40-916	40	0,75	8,20
		1,00	9,60
 LS 77-903	77	0,75	7,96
		1,00	10,62

Observe-se que, apesar de a chapa ter de resistir na fase de concretagem às solicitações representadas pelo seu peso próprio - o peso do concreto fresco e das barras de aço - e pelos carregamentos inerentes ao processo executivo, após o endurecimento do concreto considera-se que a laje de concreto armado é que absorverá todas as solicitações.

Da observação da Tabela 2.7 pode-se notar que dentre as chapas cuja perfilação é mais acentuada, isto é, aquelas de maior altura, são indicadas algumas para lajes armadas em uma direção na medida em que se vislumbra a possibilidade de posicionar-se as armaduras dentro dos canais propiciando a confecção de lajes nervuradas.

Tabela 2.7 - Produtos da "Nittetsu": fôrma para laje. (11)

PERFIL	ALTURA (mm)	ESPESSURA (mm)	PESO / ÁREA (Kg/m ²)
KP-1(AKD) 	25	0,8	8,80
		1,0	10,90
		1,2	13,00
KP-3(AKB) 	15	0,8	7,28
		1,2	10,90
		1,4	12,60
V50(ALB) 	50	1,2	13,40
		1,6	17,80
V5Q(ALF) 	50	1,2	13,40
		1,6	17,80
V60(ALB) * 	60	1,2	14,60
		1,6	19,30
UA(BLC) 	75	1,2	15,70
		1,6	20,80
		2,3	29,50
UA-N(ALK) * 	75	1,2	15,60
		1,6	20,70
		2,3	29,50
UKA(BLD) 	75	0,8	9,96
		1,0	12,40
		1,2	14,90
		1,6	19,70
		2,3	28,10
UKA-N(ALN) * 	75	1,0	12,40
		1,2	14,80
		1,6	19,70
		2,3	28,00
		2,7	35,20
SLP(APA) * 	100	1,6	21,00
		2,3	30,00
		2,7	35,20
		3,2	41,40
		4,0	51,60
		4,5	57,60
		6,0	76,00

(*) perfis indicados para utilização em lajes armadas em uma direção.

2.2.3 Chapa Dobrada com a Função de Forma e Função Estrutural na Laje Final Obtida

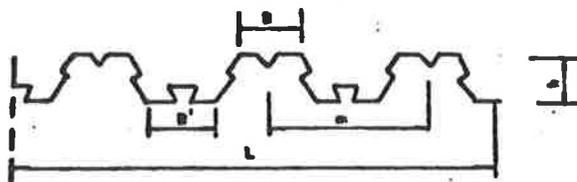
Trata-se justamente da laje composta concreto - chapa de aço dobrada, objeto principal deste trabalho. "A chapa de aço serve não somente como forma para o concreto durante a construção, mas também como principal armadura de tração da região inferior da laje composta" (22).

Na Tabela 2.8 encontram-se agrupadas algumas características dos perfis constantes dos catálogos anteriormente citados.

Tabela 2.8 - Características gerais dos perfis empregados nas lajes compostas constantes dos catálogos analisados neste trabalho. (20)

PERFIL	L (mm)	h (mm)	FORMA GEOMÉTRICA	a (mm)	B (mm)	B' (mm)	LIGAÇÃO	esp. (mm)	Seção (cm ² /m)	Peso Kg/m ²
CF 46	900	46		225	67	105	Mossas	0,85 1,15	10,80 14,59	8,3 11,2
COFRASTRA40	750	40		150	ad	ad	Mossas	0,75 0,85	ad	12,15 13,88
COFRASTRA70	732	75		183	ad	ad	Dobras	0,75 1,00	ad	11,95 16,22
FEVA 45	750	45		187 ⁵	45	83 ⁵	Dobras	0,63 0,72 0,82	9,33 10,66 12,14	8,74 10,00 11,23
PERKRON	555	76		185	ad	ad	Mossas	0,75 0,90 1,20 1,50	ad	11,44 13,73 18,30 22,80
EV 50	614	50		204 ⁷	146 ¹	38 ⁶	Mossas	1,2 1,6	16,5 21,8	13,9 18,2
EJA	600	75		200	112	58	Mossas	1,2 1,6	19,1 25,3	16,3 21,3
EZ 50	600 900	50		300	125	125	Dobras	1,2 1,6	16,3 21,6	13,3 17,4
EZ 75	600 900	75		300	120	115	Dobras	1,2 1,6	17,7 23,4	14,4 18,9

ad = sem dados disponíveis



2.3 A LAJE COMPOSTA: TERMINOLOGIA E HISTÓRICO

Toda construção possui um conjunto de partes resistentes que pode ser analiticamente considerado como um agrupamento adequado de diferentes tipos de componentes estruturais. Estes podem ser classificados, segundo um critério geométrico (23), em quatro tipos: blocos, folhas, barras e barras de elementos delgados.

As folhas "podem ser consideradas como geradas a partir de uma superfície média" (23), sendo sub-divididas em cascas, quando esta superfície for curva, e em placas e chapas, quando for plana.

As chapas são carregadas segundo a direção de seu próprio plano, enquanto as placas são carregadas perpendicularmente à sua superfície. Dentro desta conceituação uma laje pode ser considerada como uma placa.

Neste contexto, a expressão "placas compostas" adotada por Silva (21) para se referir à laje composta, se apresenta bastante coerente.

Nos trabalhos técnicos estrangeiros são encontradas várias denominações, tais como "Steel deck reinforced slabs" (24), "plancher collaborant" (16) e "composite floor slab consisting of the concrete and profiled sheet" (10).

A norma brasileira de "Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios" (25), no seu parágrafo 6, refere-se a vigas mistas como aquelas em que uma ligação adequada entre a viga de aço e a laje de concreto faz com "que elas funcionem como um conjunto para resistir à flexão em torno de um eixo perpendicular ao plano médio da alma". No parágrafo 6.2.5 esta mesma norma cita as "lajes de concreto com fôrmas de aço incorporadas" sem entrar em detalhes quanto ao funcionamento das mesmas.

A norma brasileira de Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado (26) considera como lajes nervuradas aquelas "cuja zona de tração é constituída por nervuras entre as quais podem ser postos materiais inertes, de modo a tornar plana a superfície externa". Para que a laje possa ser chamada de nervurada a resistência do material inerte deve ser desprezada; caso contrário tem-se as lajes mistas, objeto da NBR-6119 (27), definidas como "aquelas em que, entre nervuras de concreto armado ou concreto protendido, se colocam elementos intermediários, pré-fabricados, de concreto normal, ou leve, simples ou armado, ou cerâmicos, ou sílico-calcáreos, solidários com as nervuras e capazes de resistir aos esforços de compressão oriundos da flexão".

Saliente-se a utilização popular do termo "lajes mistas" para aquelas constituídas por vigotas de concreto armado ou protendido e lajotas de materiais tais como concreto e cerâmica, os quais não são considerados na determinação da resistência da laje.

Dentro deste contexto, a denominação do componente ora em estudo por "laje composta concreto - chapa de aço dobrada" mostra-se bastante interessante por vários aspectos: incorpora a idéia do funcionamento conjunto da chapa e do concreto, dá indícios do caráter nervurado da laje sem entrar em choque com a NBR-6119, é coerente com a nomenclatura internacional e não entra em choque com o linguajar popular.

Quanto à utilização da laje composta, há cerca de 50 anos surgiu a primeira idéia de se associar as vantagens do concreto e das chapas de aço dobradas para se constituir uma laje de piso. Por volta de 1938, nos EUA, passou-se a utilizar um sistema de piso celular, em alguns edifícios industriais, onde ainda não se fazia uso do trabalho solidário aço-concreto (21).

"Somente em 1950, surgiu a primeira laje armada com chapa de aço, que foi lançada no mercado sob o nome de Cofar, e era produzida por Granco Steel Products Company" (21).

No ano de 1967 realizou-se um extenso trabalho de pesquisas sobre as lajes compostas na "Iowa State University", com o auxílio do AISI (American Iron and Steel Institute) (28).

No prefácio de uma publicação do "European Convention for Constructional Steelwork", datado de setembro de 1974, comenta-se que "os pisos compostos deste tipo têm sido usados há anos na América do Norte na construção de edifícios de múltiplos andares; recentemente eles também passaram a ser utilizados largamente na Europa Ocidental mas apesar disto não existem especificações uniformes para sua análise e projeto" (29).

A "Robertson", empresa americana, instalou-se no Brasil na década passada iniciando a produção de um único perfil de chapa de aço adequado à confecção de lajes compostas, o "Q-lock", cópia fiel de um de seus produtos americanos, e que constitui-se basicamente no único perfil disponível ainda hoje em nosso país: trata-se do produto denominado comercialmente "formalaje", constante da Tabela 2.8, fabricado atualmente pela "Perkrom".

A "Robertson", num primeiro estágio, associou-se à "Tekno", empresa brasileira de renome na construção civil, para criar a "Robtek", empresa que, além do perfil "Q-lock Robtek", produzia componentes de chapa dobrada para coberturas, ventilação de galpões, vedação vertical, entre outros.

Com o desaparecimento da "Robtek", a "Tekno" assumiu toda a tecnologia desenvolvida criando a divisão "Perkrom", responsável pela confecção de uma gama de componentes a partir do dobramento ou roloformagem de chapas de aço, entre as quais a atual "formalaje".

Recentemente o grupo francês "Société des Forges D'Haironville", comprando os direitos da "Robertson", instalou-se no Brasil sob a denominação de "Haironville do Brasil", fato este que pode ser bastante importante para o desenvolvimento da utilização da laje composta no país.

2.4 CONCEPÇÃO E CONSTITUINTES DA LAJE COMPOSTA

Aborda-se, neste item, alguns aspectos preliminares quanto à concepção estrutural do componente, bem como quanto aos materiais e componentes disponíveis no mercado nacional para sua confecção.

2.4.1 Considerações Preliminares Quanto à Concepção

Na análise do comportamento estrutural da laje composta está sempre presente uma analogia parcial com as lajes de concreto armado convencionais (10, 22, 24, 28, 30). Além disso, no mercado brasileiro existe um único perfil metálico confeccionado para ser utilizado em lajes compostas, sendo que seu dimensionamento é baseado em dados fornecidos por seu fabricante original americano.

Dentro deste contexto, ainda que este trabalho não possua a intenção de estudar o dimensionamento destas lajes, discute-se alguns aspectos qualitativos de sua concepção estrutural; o entendimento do "funcionamento" da laje composta pode ser bastante útil:

- para que se conheça as limitações da analogia com as lajes de concreto armado;
- como subsídio inicial para o desenvolvimento de novos perfis pelas indústrias do setor;
- na orientação de cuidados a serem recomendados quanto à tecnologia executiva.

Para que se consiga o funcionamento como uma estrutura composta há que se garantir o trabalho solidário entre a chapa de aço e o concreto. Esta solidarização é responsável por um desempenho estrutural bastante superior ao conseguido com a simples justaposição de um componente metálico a outro de concreto, conforme se esquematiza na Figura 2.2.

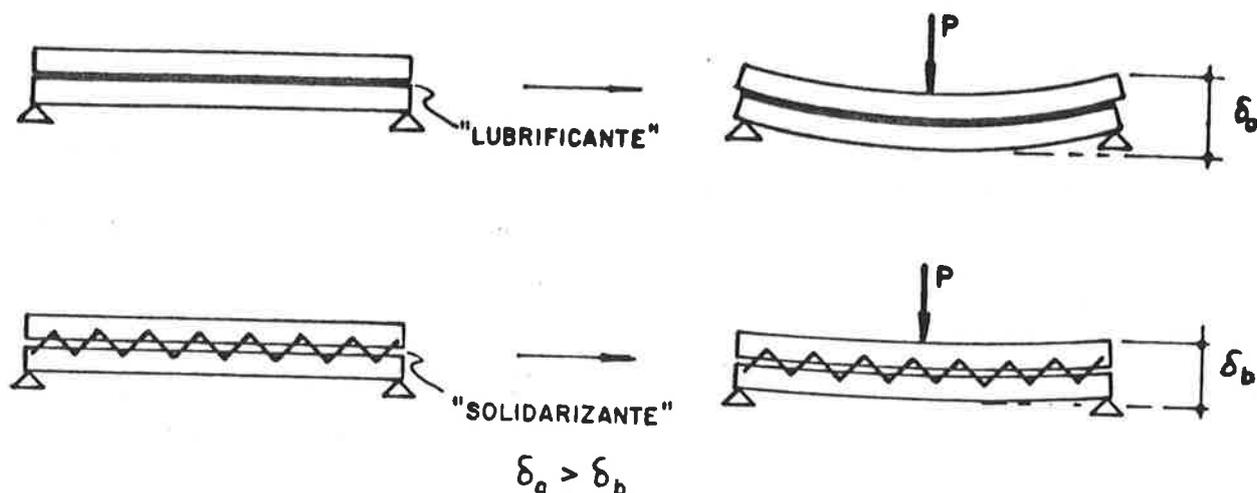


Figura 2.2 - Comportamento de componente formado por justaposição de outros dois: a) com deslocamento relativo facilitado; b) "solidarizados".

Para que a chapa de aço "sirva como armadura de tração e atue de forma composta com o concreto é necessária uma interação mecânica entre os constituintes" (30).

O trabalho conjunto dos dois componentes (chapa e concreto) pode ser conseguido por três diferentes caminhos, quais sejam:

- uma "colagem" entre eles (Figura 2.3-a);
- uma contenção das extremidades de forma a não se permitir deslocamentos relativos (Figura 2.3-b);
- uma "interpenetração" destes (Figura 2.3-c).

No que tange ao primeiro caminho, há que se ressaltar a "afinidade química" entre o aço e o concreto, que pode levar a reações entre eles, propiciando um certo grau de "colagem". O mesmo não ocorre com o alumínio.

Quanto à adoção de contenção que evite deslocamentos relativos chapa-concreto, na Figura 2.4-a mostra-se um exemplo prático, em que se adota "tampões" rígidos nas extremidades - "segurando" o concreto - enquanto a soldagem das chapas na viga restringe o "deslocamento" desta.

A própria continuidade das lajes providencia uma forma de contenção deste tipo, já que as lajes contíguas restringem o deslocamento das lajes interiores (Figura 2.4-b).

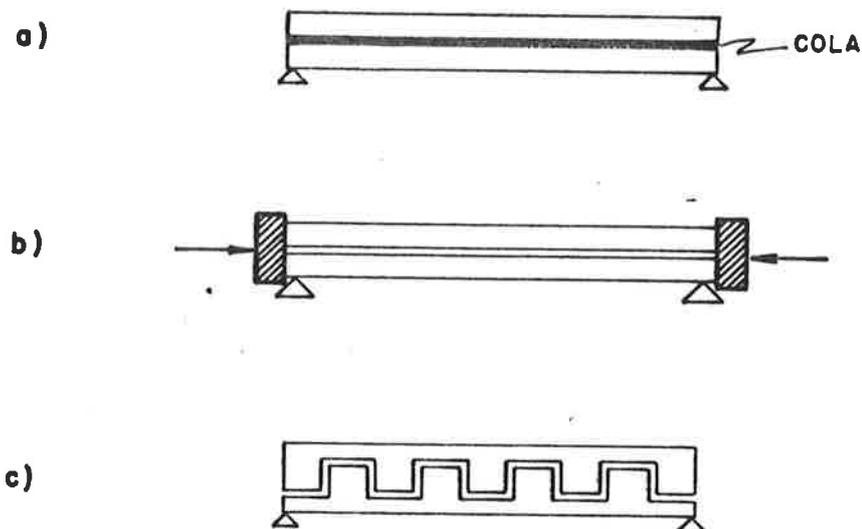


Figura 2.3 - Solidarização entre a chapa de aço e o concreto: a) "colagem"; b) "contenção" das extremidades; c) "interpenetração".

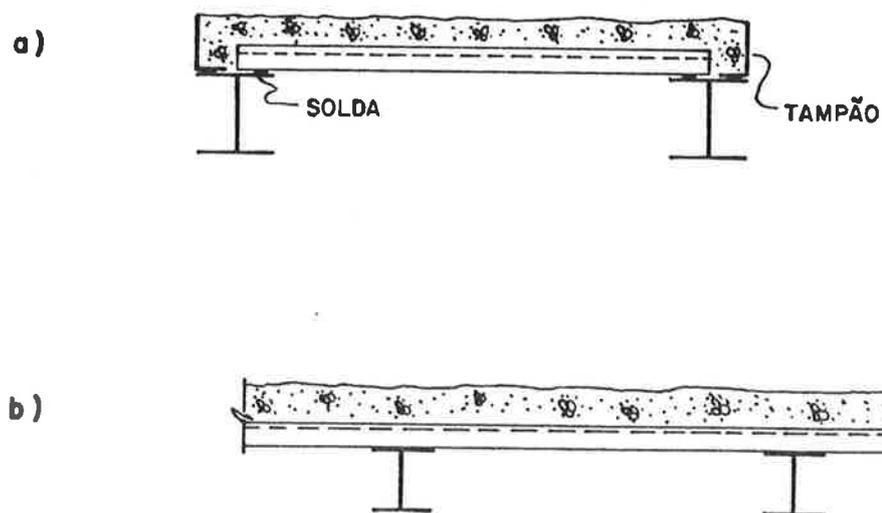


Figura 2.4 - A contenção do deslocamento relativo por: a) "tampões"; b) lajes contíguas.

Quanto à "interpenetração" entre a chapa e o concreto, são várias as formas para conseguí-la (Figura 2.5):

- adoção de "mossas" nas chapas;
- soldagem de barras de aço transversalmente às "estrias" da chapa;
- utilização de perfis "reentrantes".

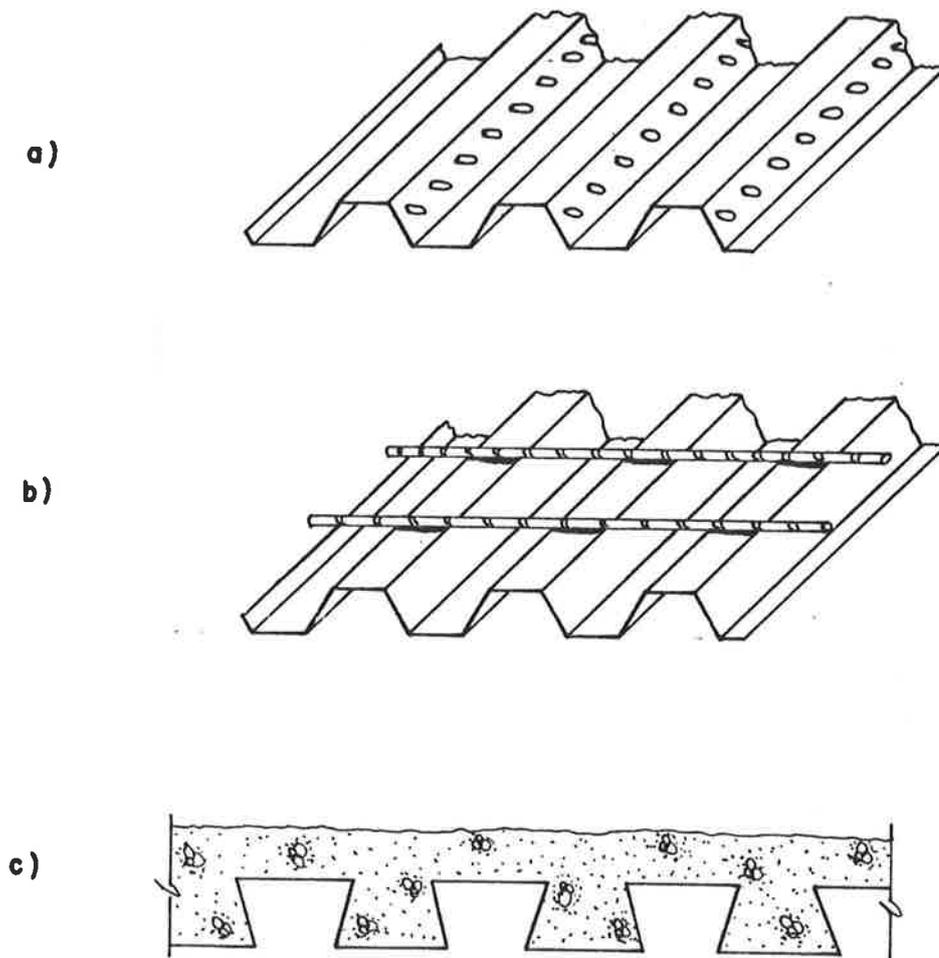


Figura 2.5 - Meios para se conseguir uma "interpenetração" entre a chapa e o concreto: a) "mossas" na chapa; b) soldagem de barras de aço na chapa; c) perfis "reentrantes".

As "mossas" (ou "repuxos") podem ser confeccionados quando da conformação da própria chapa, fazendo o papel de pequenos e inúmeros "preguinhos" que, ligando a chapa ao concreto, dificultam seu deslizamento relativo. As barras de aço

soldadas à chapa podem cumprir papel semelhante, constituindo-se em "pregos" de maior capacidade e, portanto, em menor número. Os perfis reentrantes, por sua vez, dificultam o deslizamento relativo da medida em que, quando da flexão da laje composta, o concreto se atrita mais eficientemente contra as faces da chapa inclinadas para "dentro" do mesmo.

Quando do funcionamento normal da laje, além da tendência ao deslizamento relativo, ocorre também uma propensão a destacamento relativo chapa-concreto (Figura 2.6).

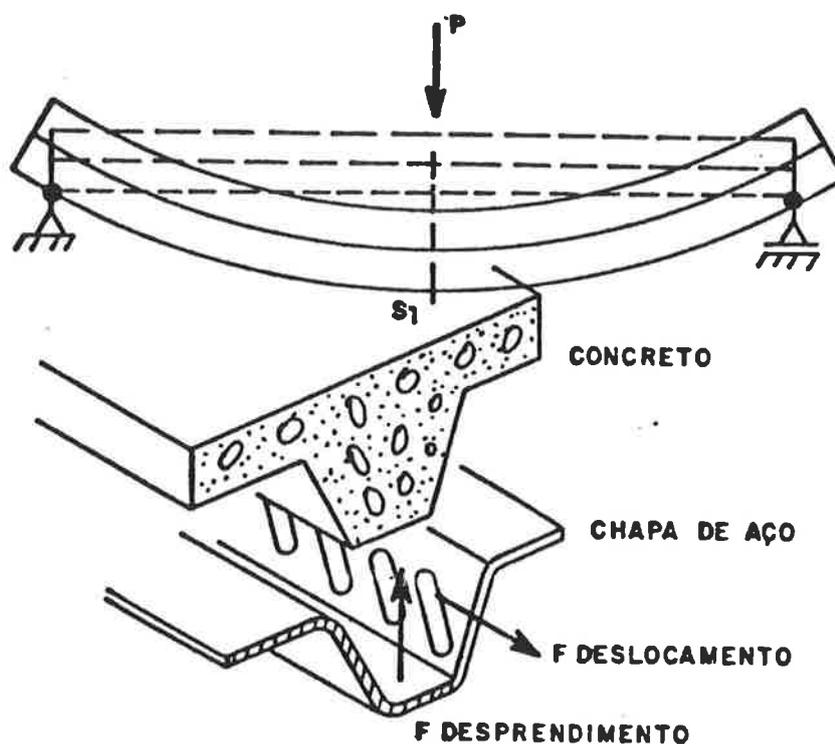


Figura 2.6 - Forças que surgem na interface aço-concreto.

Quanto a este fenômeno, é fácil compreender a eficiência dos perfis "reentrantes" em "absorvê-lo". Enquanto as barras soldadas podem também combatê-lo, as mossas, para serem eficientes, devem ser dispostas de maneira conveniente (Figura 2.7). As mossas horizontais são efetivas neste caso, não contribuindo, porém, tão eficientemente quanto ao deslizamento. As inclinadas, úteis quanto ao deslizamento, devem ser "opostamente" inclinadas, isto é, as mossas de faces contíguas devem possuir inclinações em direções ortogonais; efeito semelhante pode ser conseguido com mossas do tipo "ponta-de-flecha".

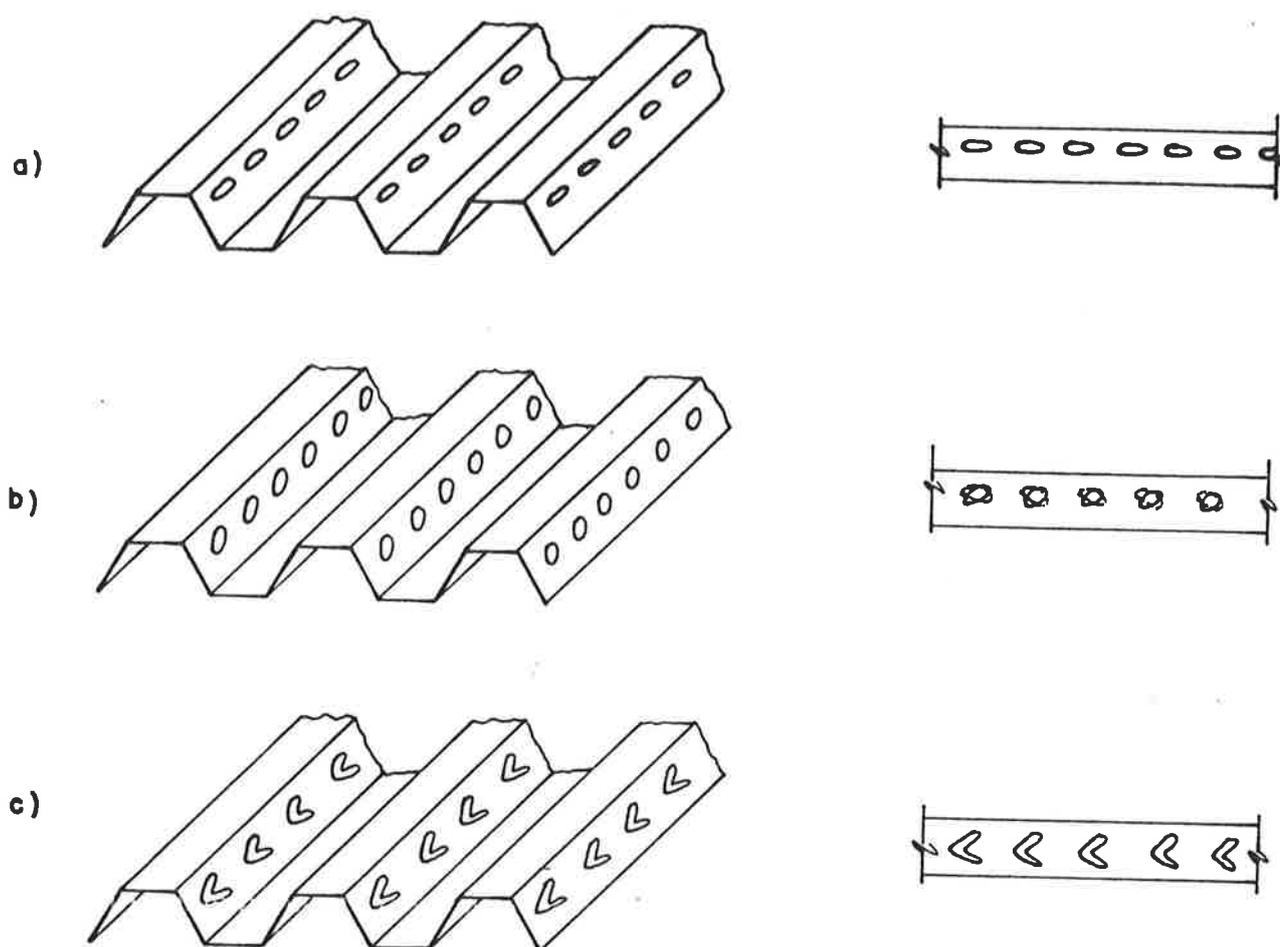


Figura 2.7 - As "mossas", em perspectiva e vista lateral, no combate ao destacamento relativo: a) horizontais; b) inclinações "opostas"; c) "ponta-de-flecha".

O dimensionamento de uma laje composta abrange duas etapas:

- fase de concretagem;
- fase após o endurecimento do concreto.

Durante a primeira etapa a chapa de aço é o único componente resistente, devendo suportar o peso do concreto fresco e as sobrecargas ocorridas na moldagem. A chapa é portanto flexionada ficando, no caso de uma laje bi-apoiada, com sua região inferior tracionada e a superior comprimida (Figura 2.8).



Figura 2.8 - A flexão da chapa durante a concretagem originando regiões comprimidas (C) e tracionadas (T).

Em função das pequenas espessuras da chapa, a flexão pode levar a instabilidades localizadas ("flambagem") das regiões comprimidas. O formato da seção transversal da chapa pode influir na sua capacidade resistente, no que tange a este fenômeno, através da criação de "enrijecedores" que dificultem a ocorrência de tais instabilidades (Figura 2.9). Os casos mostrados em "2.9-b" e "2.9-c" são favoráveis também no que tange à prevenção do destacamento relativo.

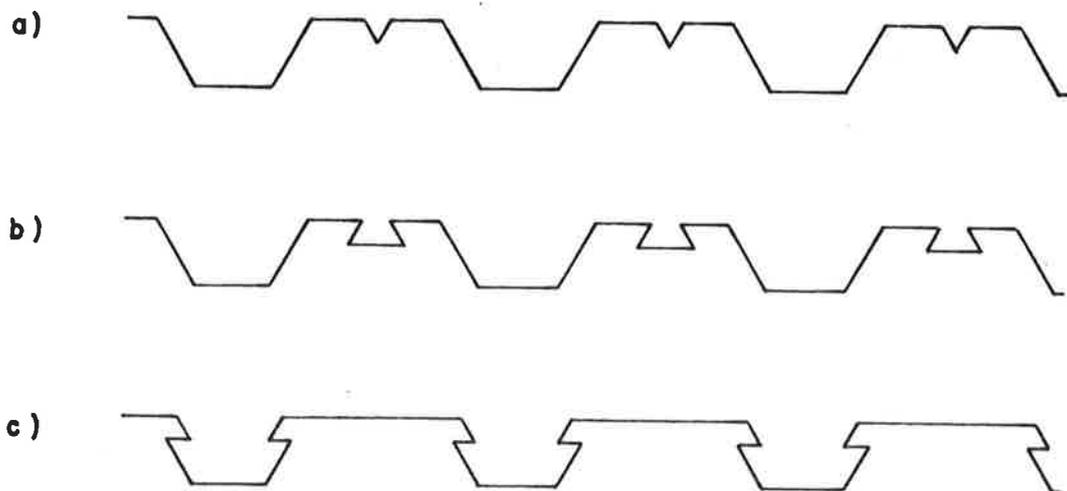


Figura 2.9 - Dobras na chapa para "enrijecê-la"; a) dobra simples na mesa superior; b) dobra reentrante na mesa superior; c) dobra na alma.

Em termos de dimensionamento, o fenômeno da flambagem pode ser levado em consideração através da definição de larguras efetivas para as mesas comprimidas e de alturas efetivas para as almas comprimidas; estes comprimentos efetivos representam uma parcela do material que, sem estar sujeito à instabilidade, possuiria a mesma capacidade resistente que o material original sujeito a esta ocorrência.

O dimensionamento, nesta fase, passa pela verificação da resistência e da deformação da chapa de aço.

Quanto à fase após o endurecimento do concreto, o dimensionamento passa pela verificação da resistência e deformação da laje composta obtida. Com relação à resistência, a segurança é verificada para três diferentes estados limites últimos (Figura 2.10) passíveis de ocorrer:

- ruína por flexão na seção 1-1;
- ruína por deslizamento relativo aço-concreto na seção 2-2;
- ruína por força cortante na seção 3-3.

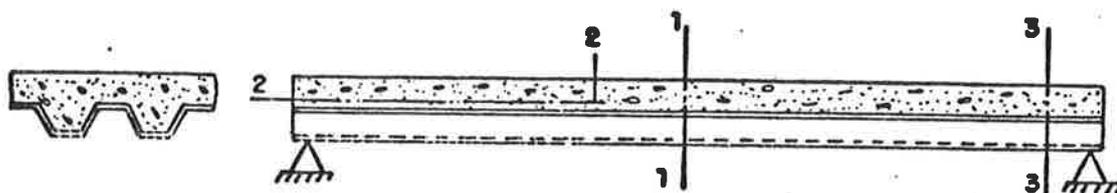


Figura 2.10 - Modos de ruína da laje composta. (31)

Quanto à flexão na seção 1-1, quanto mais aço existir na região inferior da chapa, maior a capacidade resistente da laje composta final; no entanto, menor a capacidade resistente durante a moldagem, já que se diminui o material disponível para fazer frente aos esforços de compressão. Na Tabela 2.9 procede-se a uma comparação para um mesmo perfil, com diferentes comprimentos de mesas em suas superfícies, quanto à sua utilização nas duas posições possíveis.

Quanto ao deslizamento relativo, para uma mesma quantidade total de aço por largura de laje, um perfil de maior perímetro superficial mostra-se, em linhas gerais, mais favorável que outro de maior espessura de chapa (Figura 2.11), em função da maior superfície de contato aço-concreto.

Tabela 2.9 - Comparação preliminar quanto à utilização de um mesmo perfil em posições diferentes.



	A	B
total de aço	=	=
aço na região superior	↓	↑
capacidade resistente durante a moldagem	↓	↑
aço na região inferior	↑	↓
resistência à flexão da laje composta final	↑	↓
necessidade de escoramento durante a execução	↓	↑
consumo de concreto para mesma espessura total	↓	↑

OBS: = indica mesmo desempenho
 ↑ indica desempenho superior
 ↓ indica desempenho inferior

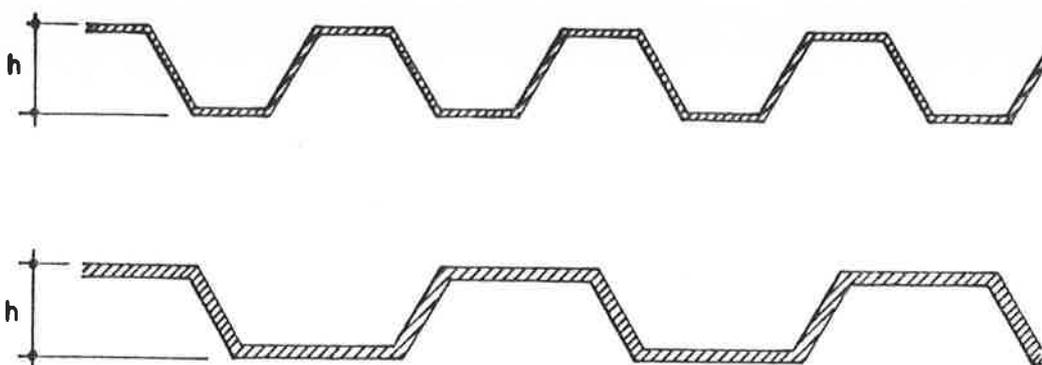


Figura 2.11 - Perfis com mesmas altura e quantidade de aço por m², mas com espessuras diferentes.

Quanto à ruptura por força cortante, trata-se do estado limite último menos frequente, prevalecendo apenas em alguns casos de lajes espessas, com vãos curtos e sollicitadas por sobrecargas elevadas.

As lajes compostas são consideradas como armadas em uma direção: a longitudinal às "estrias" da chapa de aço. Isto se dá em função de considerar-se que, para esforços horizontais transversais a esta direção, as intersecções das mesas e almas funcionem como "rótulas" (Figura 2.12).

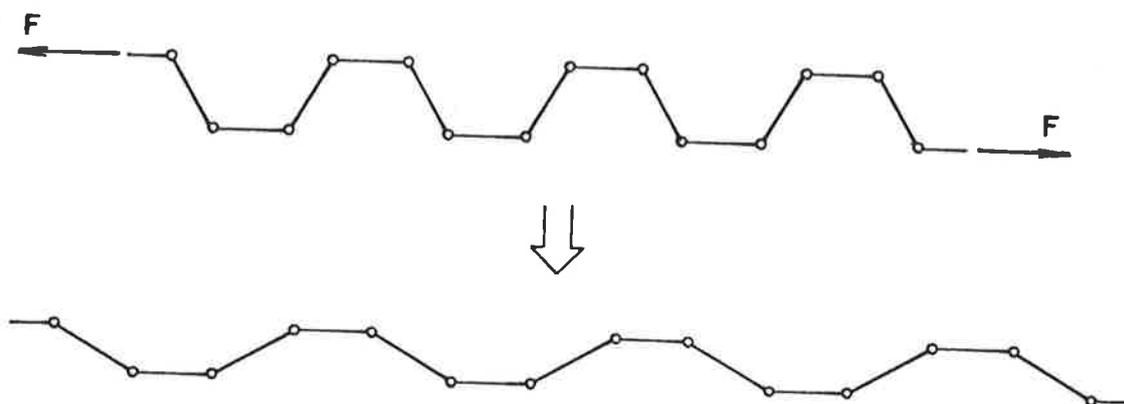


Figura 2.12 - A consideração das lajes compostas como armadas na direção longitudinal às "estrias".

No entanto, estudos experimentais (24) indicam que, para carregamentos normais, mais de 20% da sobrecarga pode ser transmitida para os apoios das bordas paralelas às estrias das lajes (Figura 2.13). Estes mesmos estudos indicam no entanto que, próximo à ruptura, quase a totalidade da sobrecarga é transmitida aos apoios transversais à laje.

2.4.2 Constituintes da Laje Composta

Uma laje composta possui como constituintes básicos o concreto e a chapa de aço dobrada. Faz-se, a seguir, algumas considerações preliminares quanto à quantidade e tipos de materiais utilizados, bem como quanto à sua obtenção.

2.4.2.1 Concreto

Na Tabela 2.10 estão reunidas indicações quanto às espessuras de concreto utilizadas para perfis diversos, as quais permitem a estimativa do consumo de concreto (desprezando-se as perdas), já que " e_{equiv} " representa a espessura de uma laje de concreto com as duas faces paralelas que tivesse o mesmo consumo de concreto que na correspondente laje composta.

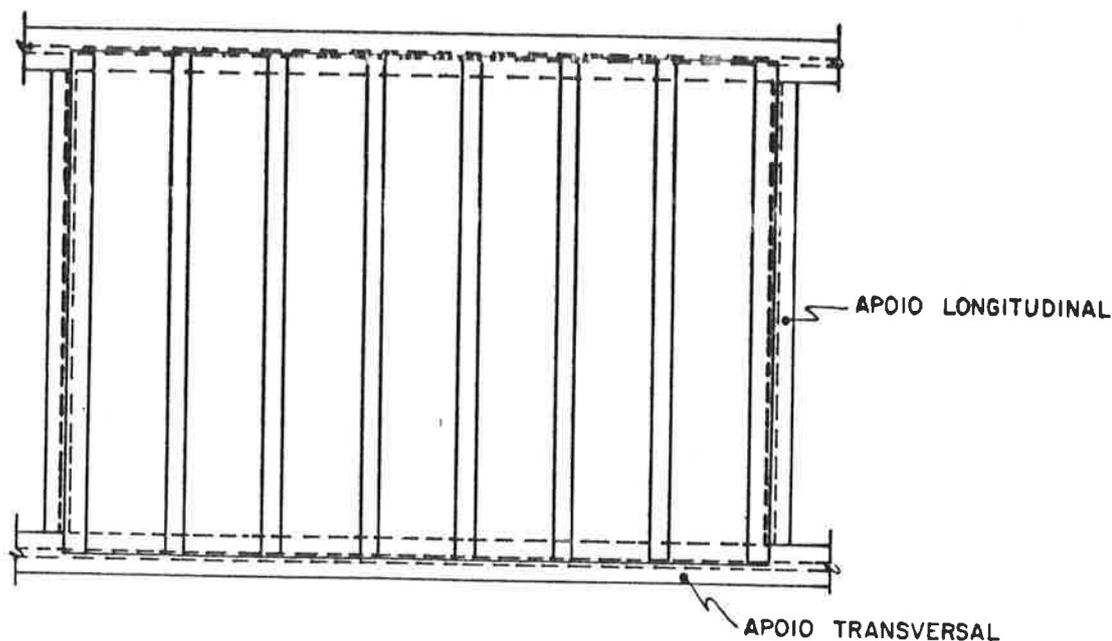


Figura 2.13 - Apoios da laje composta.

Quanto ao tipo de concreto utilizado faz-se referência, nos catálogos, à utilização de concretos normais ou leves.

Os concretos leves, segundo Neville (32), podem ser obtidos por três diferentes caminhos:

- utilizando-se agregados porosos (leves) de baixa massa específica;
- omitindo-se os agregados miúdos, o que leva à formação de grandes quantidades de vazios intersticiais;
- introduzindo-se vazios no interior da massa.

Estes últimos, denominados concretos aerados, podem diferir quanto ao processo de introdução de bolhas de gás na mistura:

- por meio de reação, entre os constituintes, que libere gás (utiliza-se comumente o alumínio em pó);
- por meio de adição de uma "espuma" na massa (concretos espumosos).

Tabela 2.10 - Espessuras de concreto utilizadas nas lajes compostas.

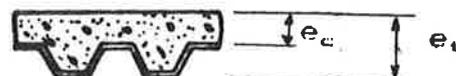
PERFIL	e_c (cm)	e_t (cm)	e_{equiv} (cm)
CF-46	5,0 a 11,4	9,6 a 16,0	s.d.
COFRASTRA 40	4,0 a 14,0	8,0 a 18,0	s.d.
COFRASTRA 70	3,5 a 13,5	11,0 a 21,0	s.d.
PEVA 45	5,5 a 19,5	10,0 a 24,0	s.d.
PERKROM	5,0	12,6	7,5
	6,0	13,6	8,5
	8,0	15,6	10,5
	10,0	17,6	12,5
EV 50	5,0	10,0	6,2
	6,0	11,0	7,2
	7,0	12,0	8,2
	8,0	13,0	9,2

s.d. = sem dados

e_c = espessura de concreto acima das nervuras

e_t = espessura total da laje

e_{equiv} = espessura de concreto equivalente



No caso das lajes compostas os concretos leves são normalmente concretos de agregados leves ou espumosos.

Quanto aos concretos normais, citam-se valores de resistência característica à compressão (f_{ck}) de 150, 180 e 210 kgf/cm².

A escolha do concreto a ser utilizado deve, entre outros, basear-se na observação adequada dos seguintes aspectos:

- resistência à compressão, que influi na capacidade resistente quanto à ruptura por flexão (vide Figura 2.10);
- aderência à chapa de aço, que influi na capacidade de resistir ao deslizamento relativo (vide Figura 2.10);

- densidade, já que durante a moldagem o concreto é uma sobrecarga relevante a solicitar a chapa de aço;
- trabalhabilidade, que deve propiciar uma aplicação rápida e eficiente.

2.4.2.2 Chapa de aço dobrada

As chapas de aço, indicadas anteriormente na Tabela 2.8, possuem em síntese as seguintes propriedades geométricas:

- largura total variando entre 555 mm e 900 mm;
- altura dos perfis variando entre 40 e 76 mm;
- espessuras variando entre 0,63 e 1,60 mm.

A espessura média é de 1,1 mm, o que equivale a dizer que os perfis de aço são obtidos a partir de chapas finas - espessura menor que 5 mm (33) - obtidas em geral por laminação a frio.

Quanto aos tipos de aço utilizados, ocorrem citações quanto a aços-carbono comuns, galvanizados e resistentes à corrosão, sendo sensível a predominância dos galvanizados em relação aos demais. Na Tabela 2.11 reúne-se as indicações de alguns fabricantes.

Tabela 2.11 - Características dos aços utilizados nos perfis para laje composta. (20)

PERFIL	PAÍS	AÇO	TRATAMENTO
CF 46	Inglaterra	BS 2989 1975 ZIC (Z 28)	Zincagem 275 g/m ²
COFRASTRA 40 e 70	França	sem dados	sem dados
PEVA 45	Finlândia	Z36-fy=3600Kgf/cm ² ES = 2100tf/cm ²	Zincagem 275g/m ²
PERKRON	Brasil	sem dados	Galvanizado CSN
EV50, EUA, EZ50, EZ75	Japão	JIS G 3352 fy=2500Kgf/cm ² ou 2100Kgf/cm ² com e sem galvanização	- não galvanizado - zincagem 120 g/m ² - zincagem 275 g/m ²

O comportamento dos aços frente à corrosão será discutido posteriormente neste trabalho.

Os perfis de aço são obtidos por "roloformagem" (Figura 2.14) de chapas planas ou bobinas de aço, num processo contínuo de sucessivas perfilações, que vão abrangendo toda a largura da chapa a partir do seu centro para as bordas.

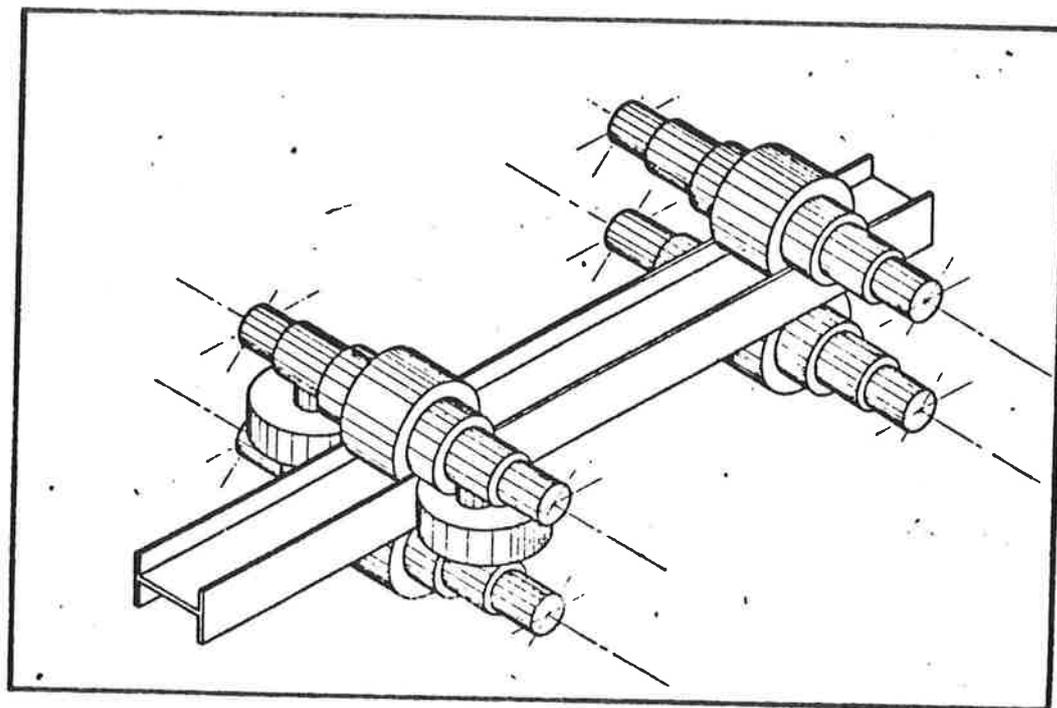


Figura 2.14 - "Roloformagem" de perfis de aço. (34)

Conforme já citado, a "Formalaje" é o único perfil para laje composta produzido hoje em nosso país. No entanto, o processo de obtenção destes perfis é inteiramente análogo ao de obtenção das telhas metálicas (Figura 2.15), necessitando-se apenas complementar o processo com "roletes embossadores", isto é, acrescentar uma operação em que são "repuxadas" as eventuais "mossas" existentes no perfil.

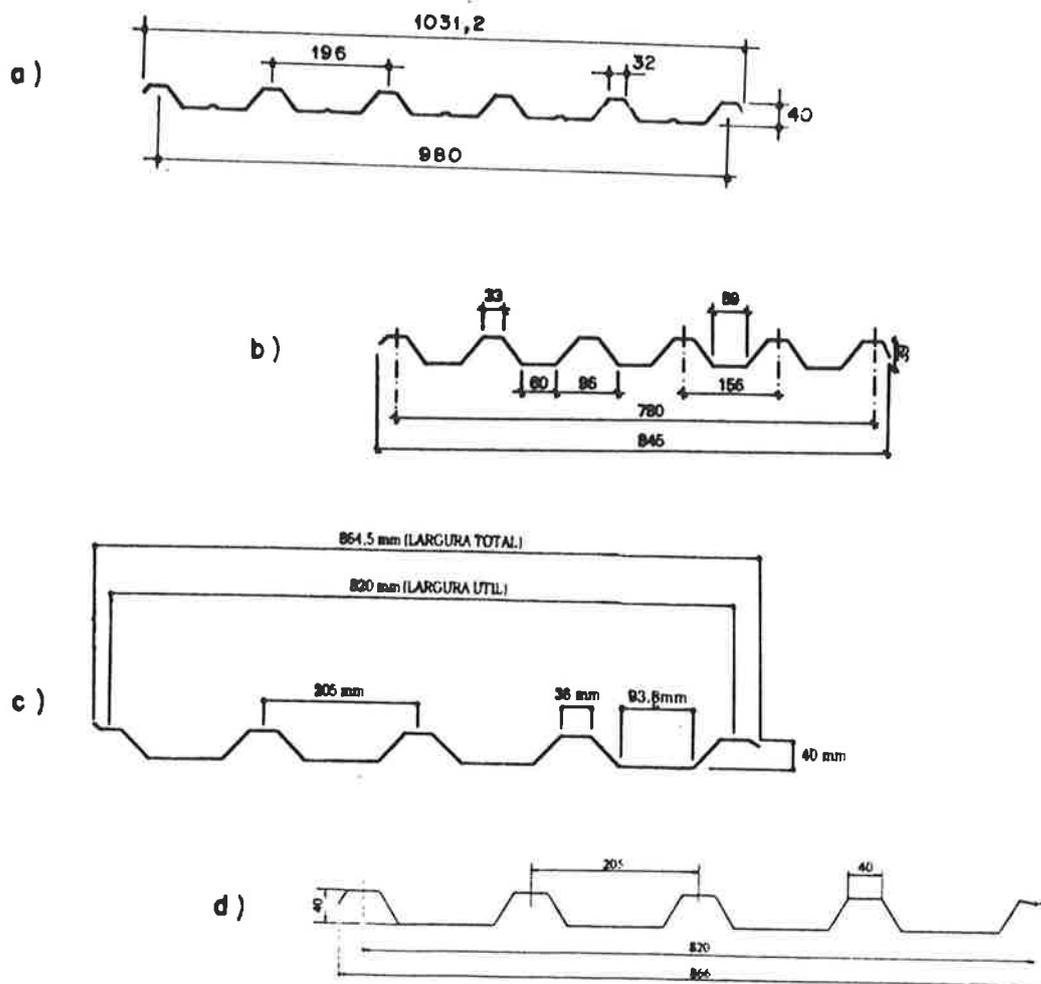


Figura 2.15 - Exemplos de perfis para telhas metálicas produzidos pelas empresas: a) Perkrom; b) Roll-For; c) Eucatex; d) Brafer. (35, 36, 37, 38)

Na Tabela 2.12 resume-se algumas características dos materiais utilizados pelos principais fabricantes de telhas metálicas de nosso país, obtidas a partir de pesquisa realizada pela EPUSP (39).

Tabela 2.12 - Características gerais das chapas de aço utilizadas na produção de telhas metálicas.

Fabricante	Largura de bobina (mm)	Espessura da chapa (mm)	Tipo de galvanização	Tipo de aço resistente à corrosão
Brafer	1.000	0,43 a 1,55	B	Cos-Ar-Cor
Central	1.000	s.d.	C	--
Eucatex	1.000	s.d.	C	--
Perkrom	1.000	0,43	B	--
	1.200	1,20		
Prosideração	s.d.	s.d.	B	--
Roll-For	1.000	s.d.	C	Cos-Ar-Cor
Zamprogna	1.000	0,50	B	--
	1.200	2,00		

s.d. = sem dados

2.5 PANORAMA ATUAL E PERSPECTIVAS DE UTILIZAÇÃO EM SUBSTITUIÇÃO AO PROCESSO CONVENCIONAL

A confecção de uma estrutura de concreto armado, ou de um componente estrutural em particular, está intimamente associada aos seguintes elementos: concreto, armaduras e fôrmas. O concreto e as armaduras, como seus constituintes principais, e as fôrmas, necessárias à sua conformação, são os aspectos básicos a orientar qualquer análise de uma estrutura de concreto armado, seja do ponto de vista técnico ou econômico.

Assim, segundo Souza e Cardoso (40), "quando se pretende uma racionalização do processo executivo de tais estruturas deve-se atuar nesses três itens".

Quanto ao concreto, os aspectos relativos à produção, mistura, transporte, lançamento e adensamento já se encontram bastante estudados e desenvolvidos. Da mesma forma, quando pensamos nas armaduras, a adoção de pátões mecanizados para corte, dobramento e mesmo pré-montagem, ou ainda a opção pela adoção de telas metálicas eletrossoldadas, são caminhos já bastante discutidos quanto à otimização do processo como um todo.

Quanto às fôrmas, no entanto, a preocupação com a racionalização é bastante mais recente. A madeira era o material tradicionalmente utilizado na confecção dos sistemas de fôrmas em nosso país; a diminuição progressiva de nossas reservas (pelo menos das mais próximas aos centros de consumo) e a conseqüente elevação dos preços deste material apontaram para dois caminhos quanto à confecção dos sistemas de fôrmas: a racionalização da utilização da madeira ou a utilização de materiais alternativos.

Além de uma responsabilidade direta pela qualidade da estrutura a ser executada, as fôrmas representam uma parcela significativa do custo final da estrutura de concreto armado, conforme pode ser observado da análise dos custos unitários indicados pela Revista Construção São Paulo (41) reproduzidos na Tabela 2.13, onde as fôrmas representam 43% do custo total.

Tabela 2.13 - Preço unitário de estruturas de concreto armado. (41)

Concreto f_{ck} 150 kg/cm ² preparado com betoneira	70,43
Ferragem CA-50/60 - 100 kg/m ³ de concreto	100,05
Fôrmas de chapa de madeira compensada - 12 m ² /m ² de concreto	142,42
Andaimes	11,48
Lançamento e aplicação do concreto	15,48
Preço total: NCz\$/m ²	329,96

Obs.: Os preços incluem os materiais, mão-de-obra, equipamentos, leis sociais e BDI (15%). Janeiro/1989.

Dentro do primeiro caminho, qual seja o da racionalização do uso da madeira, até meados deste século utilizava-se intensivamente as tábuas de pinho, sendo estas progressivamente substituídas pela madeira compensada então introduzida. Ainda devido a seu baixo custo, a madeira compensada era bastante desperdiçada; somente a partir de 1960 (42) "iniciava-se com maior determinação o trabalho de racionalização da fabricação e uso de fôrmas para concreto, com a elaboração de projetos específicos de fôrmas". Passava-se a utilizar métodos de dimensionamento que permitissem a utilização da capacidade máxima de resistência do material, dentro dos padrões de segurança, bem como a previsão de detalhes de acoplamento das peças que permitissem um manuseio facilitado com diminuição da probabilidade de se causar danos à mesma, o que prejudicaria sua vida útil; com isto aumentava-se o número de reutilizações possíveis para um mesmo painel (2), diminuindo o custo percentual das fôrmas.

Há aproximadamente dez anos deu-se início a uma nova concepção quanto aos sistemas de fôrmas: a pré-fabricação. Esta implicava numa redução das perdas em obra, além de possibilitar a redução da equipe de carpinteiros necessária.

Dentro do segundo caminho anteriormente citado, muitos foram os materiais alternativos que surgiram no mercado para cumprir o papel de fôrmas em lugar da madeira: aço, alumínio, concreto, polipropileno, poliestireno expandido, papelão, entre outros. Cada um destes mostrou-se mais ou menos viável em função de cada aplicação em particular. As fôrmas metálicas, por exemplo, apareceram com destaque quando da implementação de grandes conjuntos habitacionais com o incentivo do extinto Banco Nacional da Habitação - BNH, aplicações em que a grande repetitividade das estruturas permitia um número alto de reaproveitamentos do material (muito superior à vida útil da madeira compensada), viabilizando a utilização das fôrmas de aço.

No entanto, para o caso da construção de edifícios, quando não ocorre nenhuma peculiaridade tal qual a repetitividade acentuada ou uma concepção estrutural particular, os sistemas racionalizados constituídos pela madeira no papel de fôrma e muitas vezes com material metálico nas funções de cimbramento têm ainda dominado o nosso mercado.

A laje composta concreto-chapa de aço dobrada aparece, entretanto, como uma nova linha no contexto da racionalização dos sistemas de fôrmas na medida em que, se num primeiro momento poderia ser pensada em termos de uma solução como material alternativo no papel de molde, verifica-se que a chapa de aço dobrada cumprirá também o papel de reforço estrutural da laje final obtida.

Portanto, ao observar-se os sistemas racionalizados existentes no nosso mercado, pode-se verificar que, dos três itens básicos dos quais decorrem os aspectos relativos à confecção de uma estrutura de concreto armado (concreto, armaduras e fôrmas), só se atua sobre o terceiro de forma direta. A laje composta proposta demonstra um avanço na medida em que, além da racionalização das fôrmas em particular, representa uma proposta de racionalização das armaduras também, já que a chapa de aço cumprirá, pelo menos em parte, a função de armadura de flexão positiva da mesma. A redução, ou mesmo eliminação, dessa armadura trará uma série de benefícios, dentre os quais pode-se citar:

- diminuição da equipe de armadores necessária;
- redução dos serviços de corte, dobramento e montagem das armaduras, com a conseqüente redução dos desperdícios inerentes às mesmas;
- redução das perdas por desbitolamento das barras de aço

recebidas (observe-se que a NBR-7480 (43) permite um desbitolamento de $\pm 10\%$ em peso para bitolas menores ou iguais a 10 mm, o que pode representar, no limite, o recebimento de 82,6% do comprimento nominalmente previsto);

- redução do cronograma de execução das lajes.

Aceita a laje composta como uma proposição racionalizadora para a confecção de lajes de edifícios, restaria o questionamento a respeito da disponibilidade de matéria-prima, pois não haveria sentido em se procurar substituir a madeira por algum outro material que implicasse em problemas semelhantes de abastecimento.

Conforme se discutiu no item 2.1, o Brasil é um grande produtor de aço; mais do que isto, porém, sua produção de laminados planos, ou melhor, da matéria-prima básica para a confecção das chapas dobradas, é também bastante expressiva; segundo o Consider (3), a produção de laminados planos em 1986 alcançou 8.980.036 ton, o que representa 42% da produção nacional de aço bruto desse mesmo ano, tendo sido exportadas 2.083.681 ton.

Portanto, conclui-se que, não havendo dificuldades quanto à disponibilidade de matéria-prima nem quanto à tecnologia de dobramento das chapas, que pouco difere daquela empregada na confecção de telhas metálicas, a laje mista tem plenas condições de se apresentar como opção para a racionalização da construção civil.

Considere-se ainda que no ano de 1986 foram aprovados 6.128.518 m² de construção de edifícios residenciais de múltiplos andares em São Paulo (44); supondo-se que 10% dessa área fizesse uso da laje composta e que isto implique num consumo de 10 kg de aço/m² de laje, ter-se-ia uma demanda superior a 6.000 ton de chapas dobradas, número relevante ao ser confrontado com a produção de estruturas metálicas para edifícios de múltiplos andares anteriormente citada (vide Tabela 2.2).

3. A EXECUÇÃO DA LAJE COMPOSTA

No contexto da execução do subsistema estrutura de um edifício, as lajes representam apenas uma parcela do processo; no entanto, a adoção da laje composta concreto-chapa de aço dobrada pode interferir, ou melhor, deve ser considerada, quando do planejamento da execução da estrutura - ou mesmo do edifício - como um todo. Neste capítulo analisa-se a execução da laje em si, sendo que, ao final do mesmo, todo o entorno do processo será enfocado, porém com um nível inferior de detalhamento.

Em função da pouca utilização de lajes compostas em nosso país, as recomendações aqui contidas basearam-se na observação crítica de algumas obras visitadas, na discussão com fabricantes e montadores de telhas de aço e, principalmente, em recomendações constantes de catálogos de produtos estrangeiros (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 45, 46).

A execução das lajes compostas passa por uma série de etapas (Figura 3.1), que serão descritas a seguir.

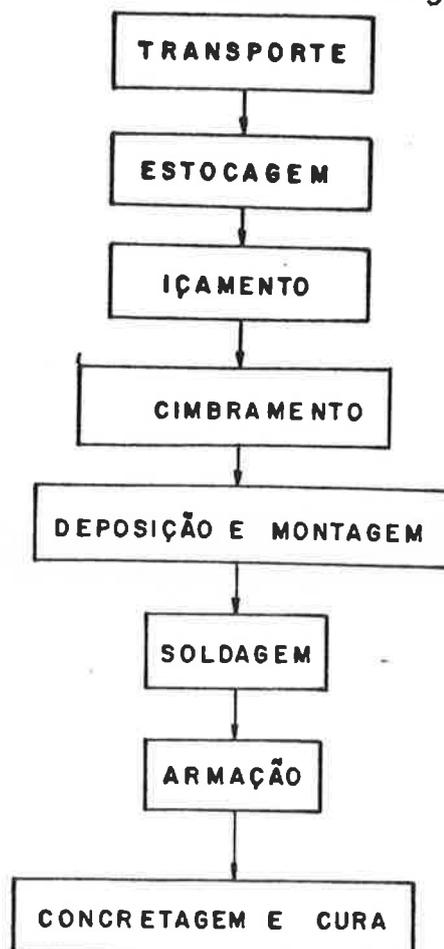


Figura 3.1 - Etapas de aplicação das lajes compostas.

3.1 TRANSPORTE

Um dos principais problemas a serem observados no transporte das chapas refere-se à capacidade de os perfis conseguirem ser empilhados de forma compacta. Tanto mais otimizada a atividade será quanto melhor se der o acoplamento entre os perfis; isto pode ser facilmente visualizado na Figura 3.2, onde o formato do perfil trapezoidal favorece a compactidade, além de diminuir os riscos de emassamentos da chapa.

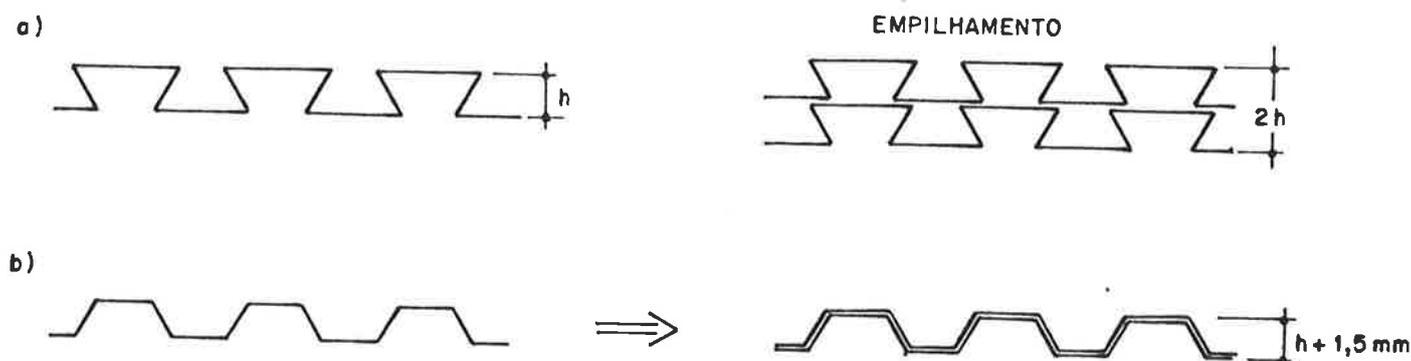


Figura 3.2 - Empilhamento de perfis: a) rabo-de-andorinha; b) trapezoidal.

Em termos gerais, os cuidados no transporte dos perfis para lajes pouco diferem daqueles recomendados para as telhas metálicas.

As chapas são normalmente acondicionadas na forma de "pacotes" ("pallets") constituídos por estrados em geral de madeira, sobre os quais as telhas são empilhadas e solidarizadas através de fitas de aço, sendo transportadas até a obra por meio de caminhões.

As chapas costumam ser descarregadas manualmente; para tanto recomenda-se um igual número de operários sobre a carroceria do caminhão e no solo. O descarregamento com tempo chuvoso ou muito úmido não é recomendado; além disso, verificando-se qualquer forma de umidade nas telhas recebidas, antes de estoca-lás devem ser cuidadosamente enxugadas com estopa ou ar comprimido.

Pode-se fazer uso de descarregamento mecânico, seja através de equipamento do tipo empilhadeira, ou seja através de equipamentos de içamento (guindaste, grua, talha, etc).

O transporte horizontal dentro da obra é normalmente manual (Figura 3.3), podendo ser feito por um único operário (pequenos comprimentos), por dois operários (comprimentos médios) ou por quatro operários (perfis muito longos); neste último caso o componente é posicionado sobre dois apoios transversais para se evitar arranhões ou amassamentos.

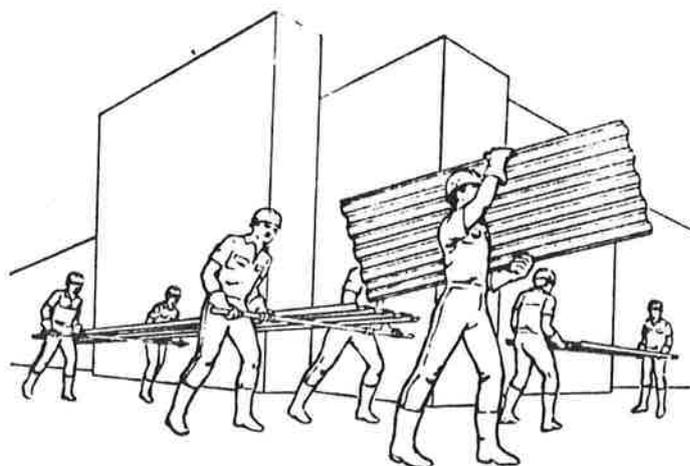
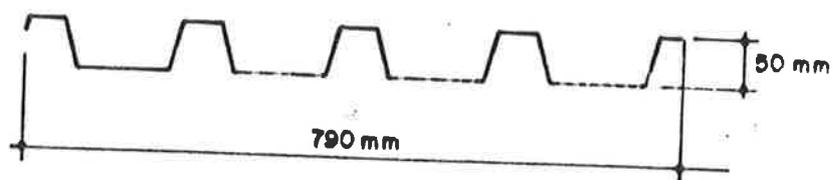


Figura 3.3 - Transporte horizontal dos componentes. (35)

A compactidade conseguida no empilhamento está associada ao aproveitamento da capacidade de carga do veículo de transporte, o que se reflete inclusive a nível do preço final do componente. Compare-se, por exemplo, os dois perfis mostrados na Figura 3.4; nota-se no caso "b" que, por inexistir na prática a possibilidade de interpenetração dos perfis, adota-se o artifício de contrapor dois a dois os mesmos, de forma a conseguir a maior compactidade possível para a pilha final.

Supondo verificar-se um espaçamento vertical entre perfis consecutivos da pilha de 1,5 mm no caso "a" e de 1,0 mm no caso "b", para espessuras de chapa de 1 mm, tem-se um volume ocupado (paralelepípedo envolvente) por metro linear de componente de 0,057 m³ para o caso "a" e de 0,235 m³ para o caso "b".

a)



b)

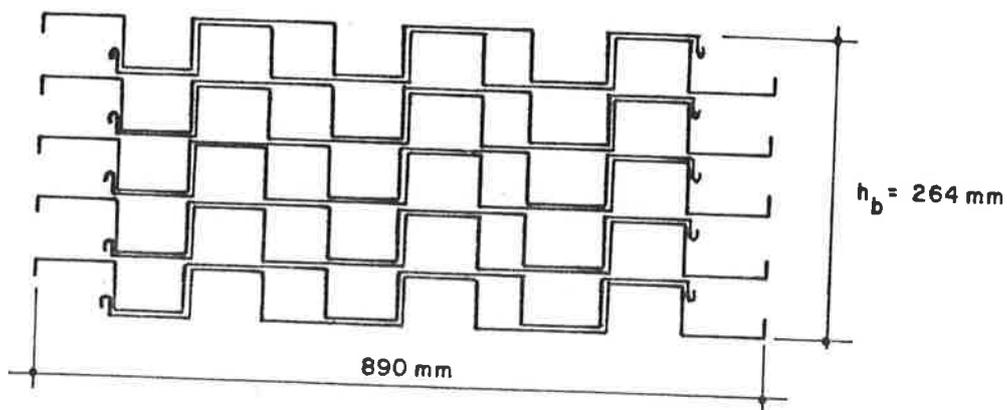
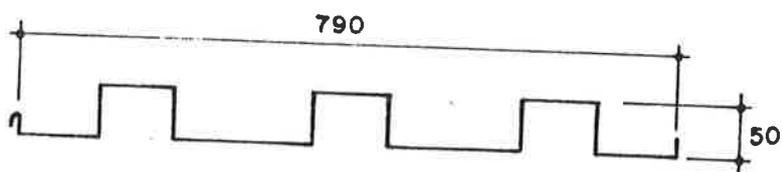


Figura 3.4 - Empilhamento de 10 perfis do tipo: a) "trapezoidal"; b) "quadrado".

3.2 ESTOCAGEM

Os perfis devem ser estocados protegidos da ação dos agentes atmosféricos, sobretudo da chuva. A estocagem deve ser feita por um período o menor possível; a concentração de umidade entre os componentes sobrepostos e a falta de ventilação podem gerar a ocorrência de corrosão. Alguns fabricantes de telhas galvanizadas indicam uma duração máxima de 60 dias de estocagem, recomendando ainda alguns cuidados tais como:

- utilizar de preferência locais cobertos e secos;
- espaçar de no mínimo 15 cm os componentes em relação ao piso, adotando calços transversais intermediários nas pilhas (Figura 3.5.a);
- no caso de locais sujeitos a chuva, providenciar cobertura com lona ou outro material impermeável (Figura 3.5.b), procurando garantir ventilação adequada;
- providenciar leve inclinação no sentido longitudinal, de modo a facilitar o escoamento da água que eventualmente venha a se acumular.

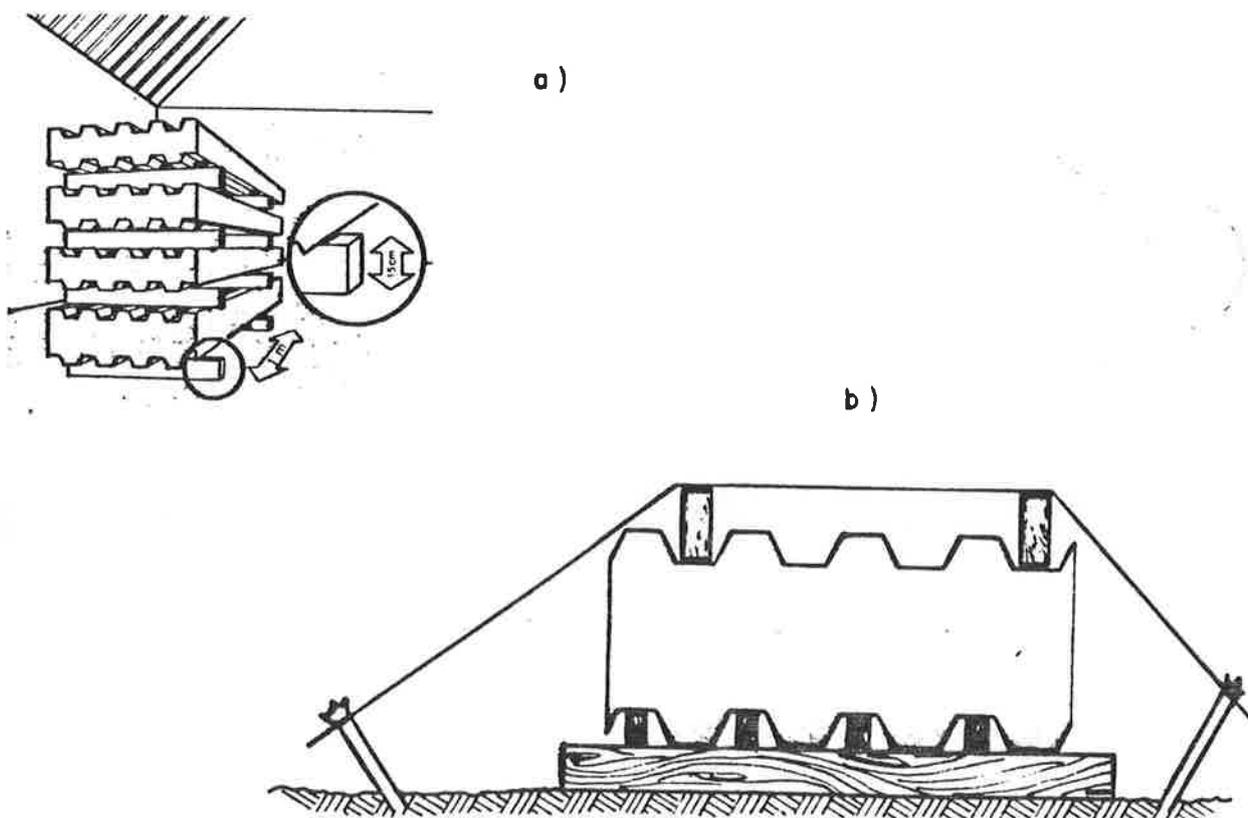


Figura 3.5 - Cuidados na estocagem: a) espaçamento do piso; b) cobertura contra a chuva. (47)

3.3 IÇAMENTO

O levantamento das chapas dobradas até sua posição de utilização pode ser manual ou através de içadores manuais ou mecânicos, tais como talhas, guindastes, gruas, etc.

As chapas podem ser transportadas individualmente ou elevar-se todo um "pallet" de uma vez, desde que a estrutura existente esteja dimensionada para suportar o seu peso.

Em obras baixas o içamento manual é normalmente utilizado, seja através da confecção de rampas de acesso ao pavimento a ser coberto, ou seja através de talhas conforme ilustrado na Figura 3.6.

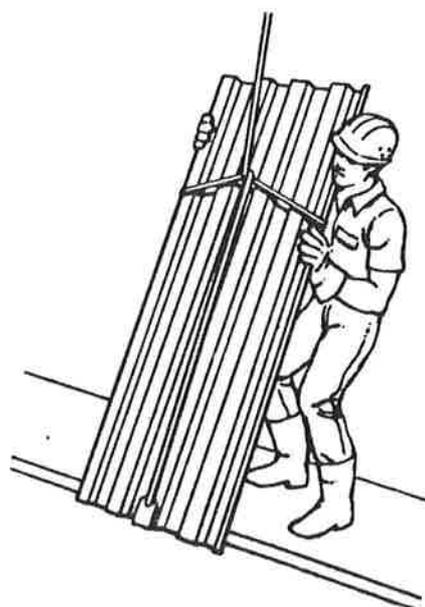


Figura 3.6 - Içamento de chapas. (35)

Deve-se procurar não arrastar os componentes contra o piso ou entre si, de forma a evitar arranhões ou amassamentos.

No caso de edifícios de múltiplos andares, o transporte paletizado através de equipamentos mecânicos de maior porte, tais como as gruas, costuma ser a solução ideal. No caso de os "pacotes" não possuírem rigidez suficiente, deve-se adotar recursos que minimizem a compressão lateral dos perfis (Figura 3.7).

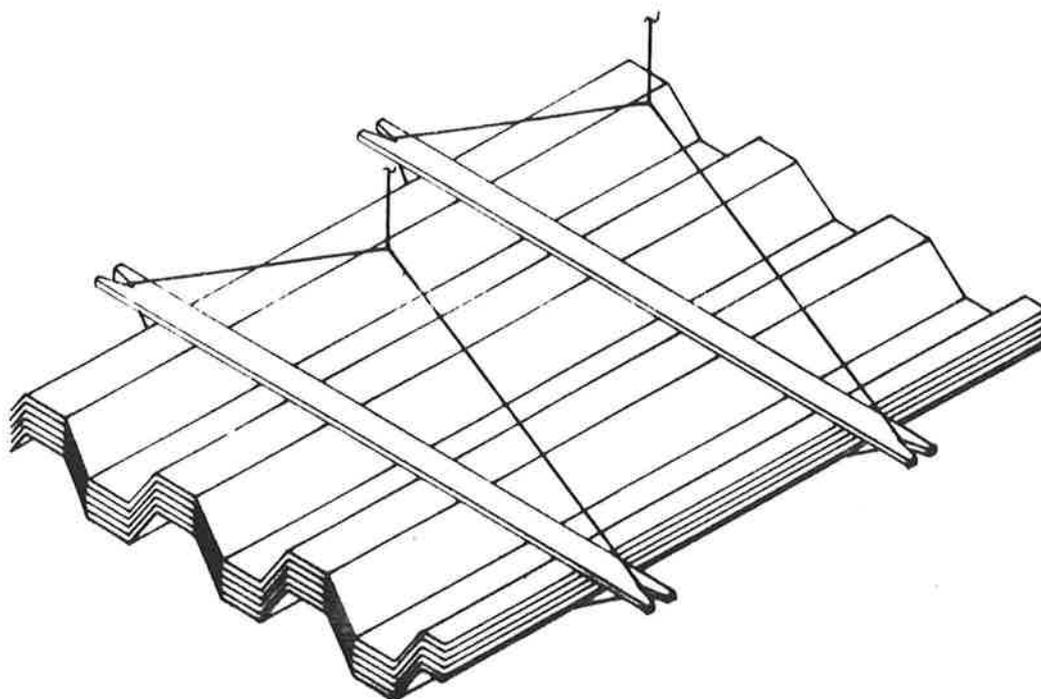


Figura 3.7 - Dispositivos para evitar compressão lateral no içamento das chapas.

O próprio elevador de obra pode ser utilizado no serviço de içamento dos componentes, que podem ser posicionados no seu interior ou pendurados sob o mesmo.

Cuidados especiais devem ser observados em dias de condições atmosféricas adversas, sobretudo quando da ocorrência de ventos fortes.

3.4 CIMBRAMENTO

Um sistema de fôrmas tradicional pode ser decomposto em molde e cimbramento, sendo este último responsável pela estruturação e escoramento do molde. No caso da laje composta, a própria chapa cumpre o papel de molde, sendo que o cimbramento é representado, como regra geral, por vigas horizontais sobre as quais as chapas se apoiam e elementos verticais - as escoras - que transmitem a carga destas últimas até o piso inferior.

Cabe salientar que algumas vezes pode-se prescindir do cimbramento, bem como em outras inexitem as escoras, sendo que o vigamento horizontal descarrega diretamente nas vigas do piso em execução. A ocorrência da primeira hipótese é função, entre outros fatores, da forma e espessura da chapa,

do tipo de aço, sobrecargas previstas e deformações previsíveis, sendo definida a nível de projeto estrutural. A segunda delas pode ser adotada desde que as vigas de contorno sejam capazes de resistir aos esforços associados; é comum sua adoção no caso de edifícios com estrutura de aço.

Quando da necessidade, porém, da utilização de apoios intermediários, pode-se optar por soluções bastante variadas. A capacidade resistente predominante na direção das nervuras implica em que o viga horizontal de apoio das chapas seja transversal às mesmas, subdividindo-as em mais de um tramo (Figura 3.8). Este viga se apoiaria nas escoras verticais. Na Figura 3.9 podem ser vistas algumas soluções.

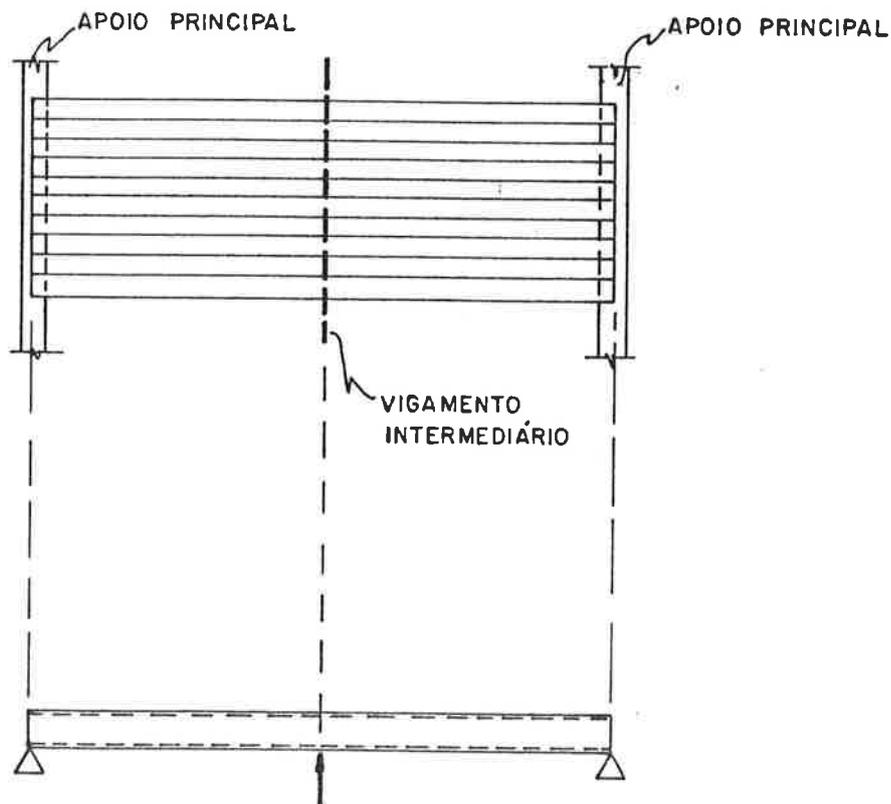
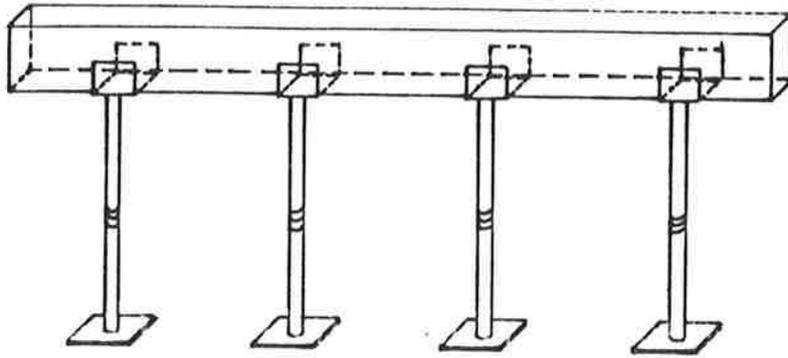
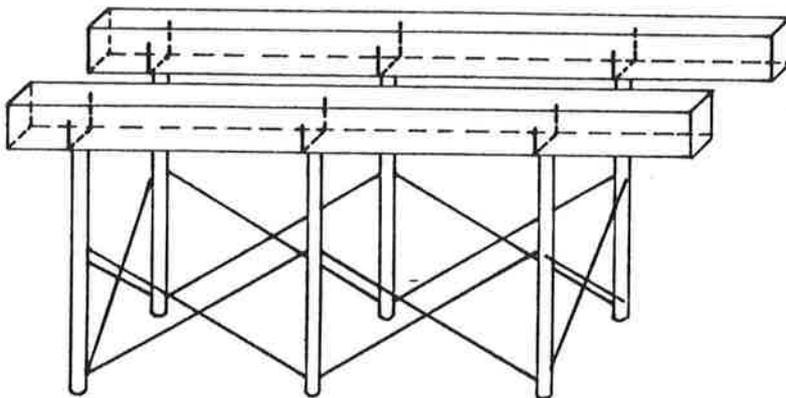


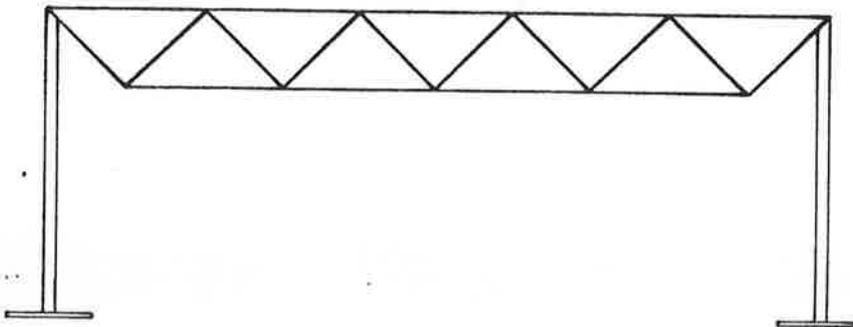
Figura 3.8 - Vigamento horizontal de apoio das chapas.



a) ESCORAMENTOS PUNTUAIS



b) TORRES



c) TRELIÇAS EXTENSÍVEIS

Figura 3.9 - Exemplos de cimbramentos passíveis de utilização para lajes compostas.

A solução mais tradicional seria a representada por "3.9.a", onde o elemento transversal de apoio da chapa bem como as escoras podem ser de diversos materiais e formatos; esta solução é bastante comum em cimbramentos de lajes de

edifícios feitos pelo processo tradicional em concreto armado.

Em "3.9.b" mostra-se a opção de utilização de torre intermediária, perfazendo um apoio duplo que, da mesma forma que a solução anterior, transmite as cargas escoradas para a laje inferior.

Como aspecto particular, pode-se citar uma situação em que esta solução mostra-se bastante interessante: seja o caso de moldar-se as vigas de concreto armado previamente à laje composta; neste caso torna-se de grande interesse a existência de passarelas laterais à fôrma da viga, por onde transitarão operários, inicialmente para a concretagem da viga e, posteriormente, para a montagem das chapas metálicas, facilitando o trabalho principalmente no que tange às vigas de borda. Neste contexto, a utilização de torres metálicas para escoramento das vigas mostra-se bastante interessante (Figura 3.10).

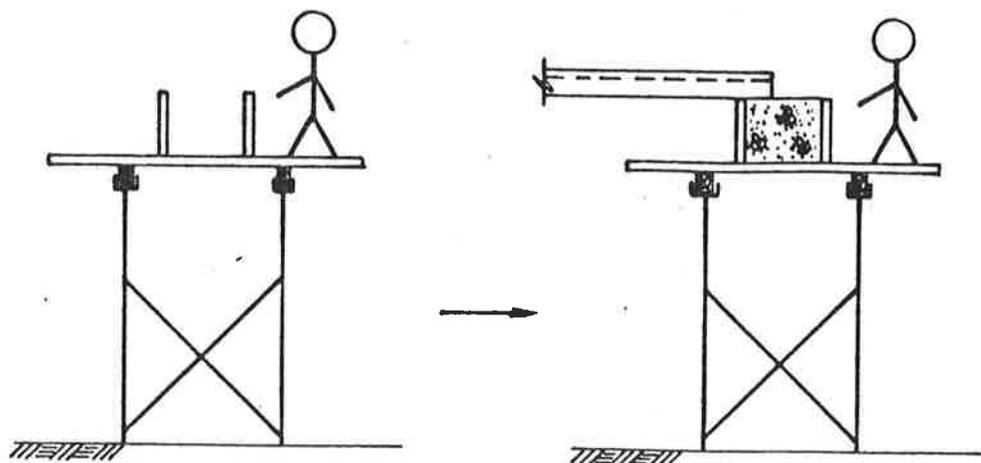


Figura 3.10 - O uso de torres propiciando a criação de passarelas para os operários.

Após a montagem dos perfis, as torres podem ser transferidas para posições mais convenientes para atuarem como cimbramento para as chapas quando de sua concretagem (Figura 3.11).

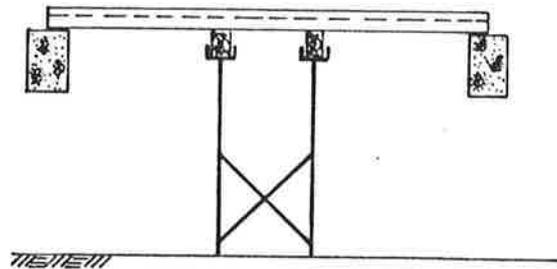


Figura 3.11 - Transferência das torres para o centro do voo.

A terceira solução, apresentada em "3.9.c", se apresenta de grande interesse na medida em que pode tornar possível a eliminação de escoramentos sobre a laje inferior, evitando-se a transferência de cargas para a mesma e facilitando a movimentação de operários, materiais e equipamentos. Esta solução pode ser adotada tanto para vigas de concreto armado (concretadas previamente ou concomitantemente às lajes) quanto para vigas de aço, situação em que esta opção pode se mostrar ainda mais interessante (Figura 3.12).

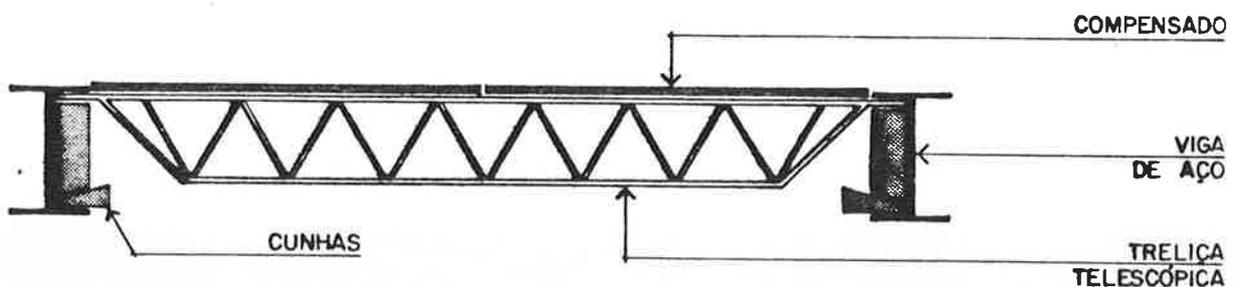


Figura 3.12 - Treliça extensível apoiada diretamente nas vigas metálicas.

Seja qual for a solução adotada, cuidados especiais devem ser reservados ao caso em que utilizar-se-á a chapa dobrada aparente como solução final para o ambiente inferior; a fim de se prevenir contra eventuais danos às chapas nos apoios intermediários, pode-se fazer uso de tiras de espuma ou papelão para evitar o contato direto chapa-escoramento (Figura 3.13).

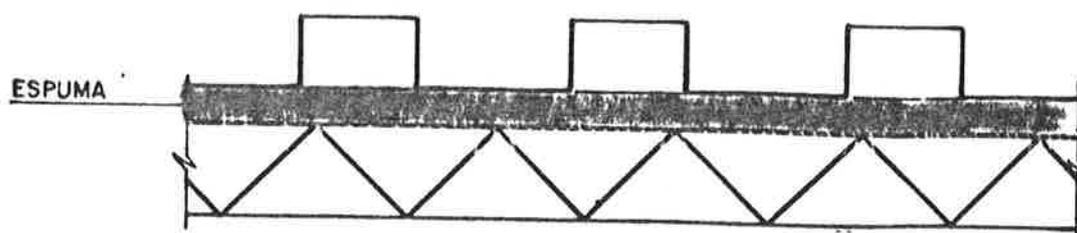
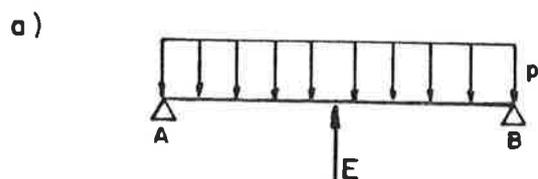


Figura 3.13 - A adoção de elemento intermediário no contato chapa-vigamento.

Como aspecto bastante relevante no que tange à laje composta, ressalte-se que, quando do seu dimensionamento, deve-se conhecer detalhadamente o escoramento a ser adotado; a utilização de um número maior de linhas intermediárias de apoio pode ser contra a segurança da laje final.

Analise-se um pouco mais detidamente este aspecto; seja a situação ilustrada pela Figura 3.14.a, onde encontra-se esquematizada uma viga apoiada nos pontos "A" e "B" e com um escoramento provisório intermediário "E", carregada com a carga linearmente distribuída "p".



b)

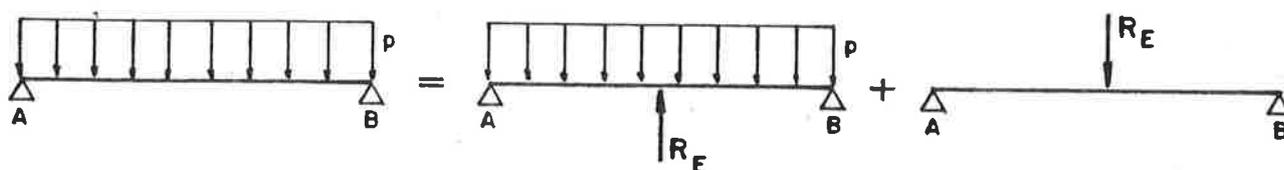


Figura 3.14 - Representação esquemática: a) viga bi-apoiada escorada intermediariamente; b) situações de igualdade de esforços dentro do regime elástico.

A igualdade dos diagramas de esforços solicitantes finais entre os esquemas ilustrados em 3.14.b ocorre desde que a viga A-B mantenha suas características ao longo do tempo.

Fazendo uma analogia com a laje composta, que pode, à semelhança das lajes de concreto armado, ser dimensionada como viga de largura unitária, não se teria a igualdade de esforços solicitantes ilustrada em 3.14.b.

Durante a concretagem, a chapa dobrada é o único constituinte resistente da laje; é somente após o endurecimento do concreto que a viga A-B passa a ser representada pela laje composta. A retirada de uma escora intermediária vai equivaler a submeter-se a laje composta a um esforço vertical equivalente à carga que esta sustentava. A flexão gerada pode mais crítica para o dimensionamento da laje que a sua concretagem sem escoramentos, por exemplo.

3.5 DEPOSIÇÃO E MONTAGEM

Tendo sido levada uma série de chapas para o pavimento de aplicação, cada uma delas será então individualmente depositada em sua posição final manualmente.

A montagem deve seguir uma ordem de tal forma que as chapas sucessivamente montadas sirvam de plataforma de trabalho para a continuação da atividade.

Embora sem a mesma relevância que no caso da montagem de coberturas com telhas de aço, a direção predominante dos ventos pode servir como orientação para o sentido da montagem sucessiva das chapas (Figura 3.15).

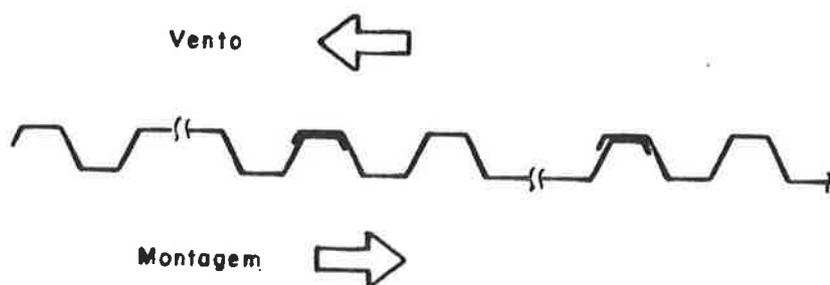


Figura 3.15 - A direção predominante dos ventos como orientação do sentido de montagem das chapas dobradas. (47)

A sequência correta de montagem deve considerar a superposição adequada dos componentes (Figura 3.16).

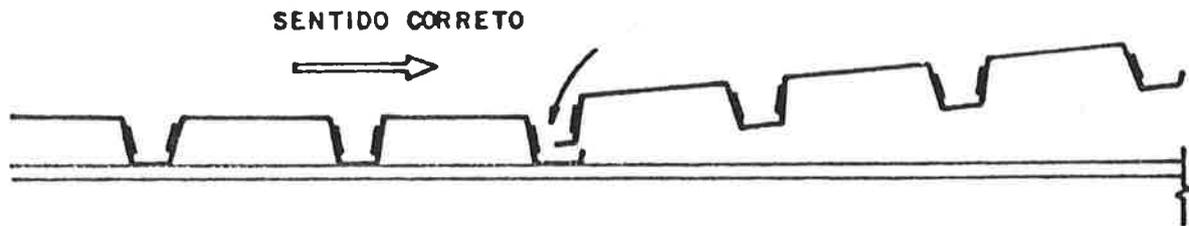


Figura 3.16 - Sentido de montagem dos perfis. (31)

No caso de perfis acoplados por encaixe, como por exemplo a "formalaje" da Perkrom, a deposição deve ser feita inicialmente com o acerto do encaixe, para evitar amassamentos do mesmo, conforme ilustra a Figura 3.17.

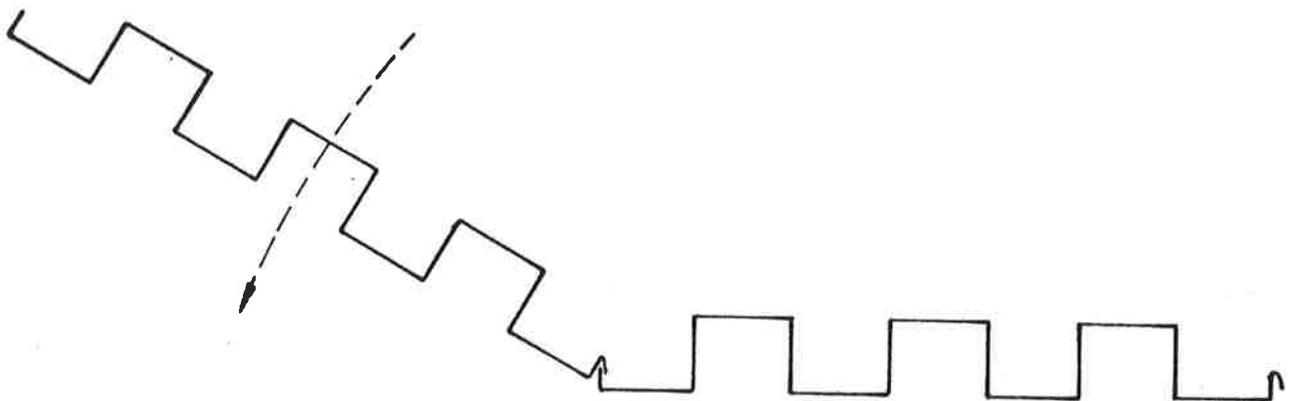


Figura 3.17 - Movimento correto de deposição de novo perfil.

Em função da regularidade dimensional dos componentes, estando a estrutura suporte corretamente locada, o posicionamento das chapas dobradas é bastante simples. Estas vão sendo sucessivamente dispostas lateralmente uma à outra (Figura 3.18), com os recobrimentos indicados pelos fabricantes, de forma a cobrir todo o vão.

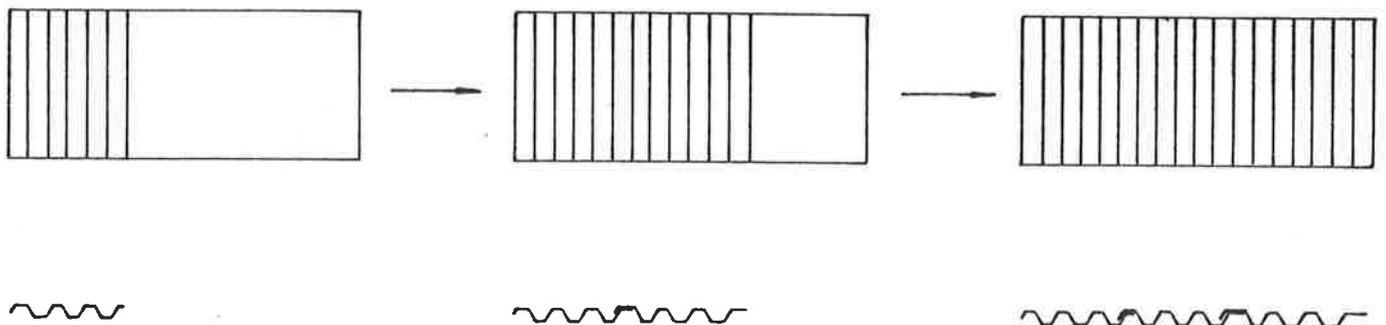


Figura 3.18 - Posicionamento sequencial das chapas.

Eventuais desvios quanto às dimensões transversais às nervuras podem ser facilmente corrigidos devido ao caráter deformável (efeito "sanfona") do componente. Na Figura 3.19 ilustra-se a utilização de um gabarito de madeira que serve de apoio para o encravamento de uma cunha contra o perfil, a qual o faz reduzir de largura.

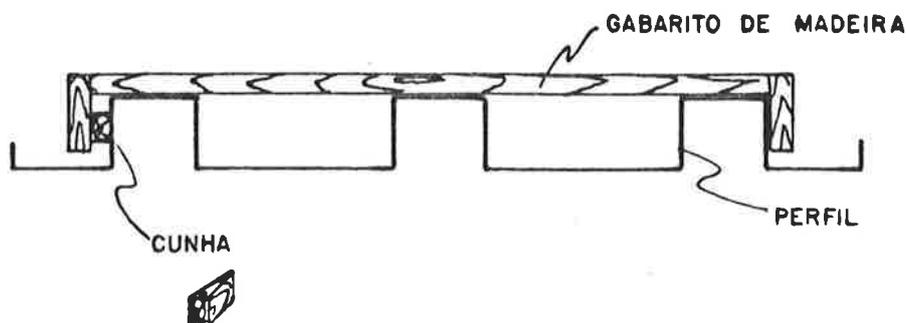


Figura 3.19 - Modificação da largura dos componentes.

Se quanto ao comprimento o processo de roloformagem permite a obtenção de quaisquer dimensões, as larguras dos componentes são definidas. Portanto uma modulação da largura dos vãos, quando do projeto da estrutura, é importante quanto à minimização de perdas de chapa devido a recortes. Quanto a este aspecto, a Nittetsu (11) fornece o mesmo perfil com duas larguras úteis - 60 cm e 90 cm - cuja associação pode minimizar as perdas.

Ao se posicionar cada chapa, deve-se provê-la de uma fixação - ainda que parcial - à estrutura, de forma a que não seja deslocada pelo vento, por exemplo. Esta fixação é facilmente resolvida no caso de estruturas de aço, procedendo-se à execução de alguns pontos de solda ligando o perfil à viga (Figura 3.20).

No caso de uma estrutura de concreto, no entanto, a resolução pode seguir por dois caminhos:

- se as vigas forem moldadas simultaneamente à laje, a chapa dobrada deve de alguma forma ser afixada provisoriamente ao sistema de fôrmas;
- caso a viga de concreto armado seja executada previamente à laje, pode-se inserir no concreto ainda fresco tiras metálicas ancoradas através de dispositivos do tipo "rabo-de-andorinha" imersos na viga (Figura 3.21), as quais servirão de base para a soldagem da chapa dobrada conforme se precedeu no caso de estruturas de aço.

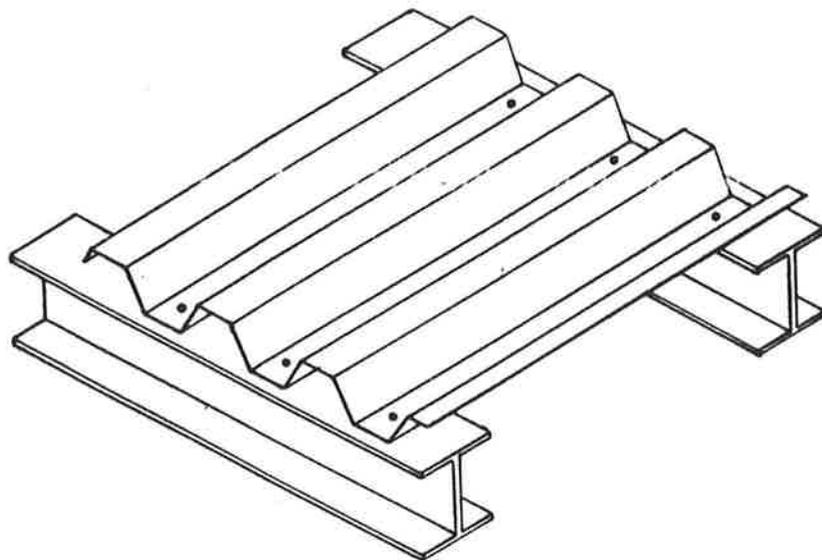


Figura 3.20 - Fixação de chapa às vigas de aço por meio de pontos de solda.

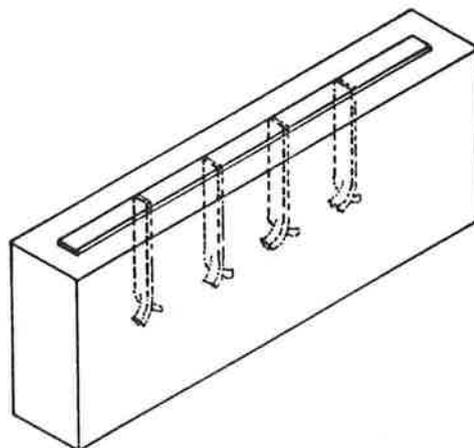


Figura 3.21 - Solidarização de tiras metálicas ao concreto para servir de base para a fixação da chapa.

A execução de apoios adequados sobre a estrutura suporte é também de grande importância. Na Figura 3.22 tem-se

recomendações quanto aos apoios transversais às nervuras para o caso de estruturas de aço. Nota-se a presença de componentes complementares, denominados "tampões", que garantem a estanqueidade das extremidades quando da concretagem.

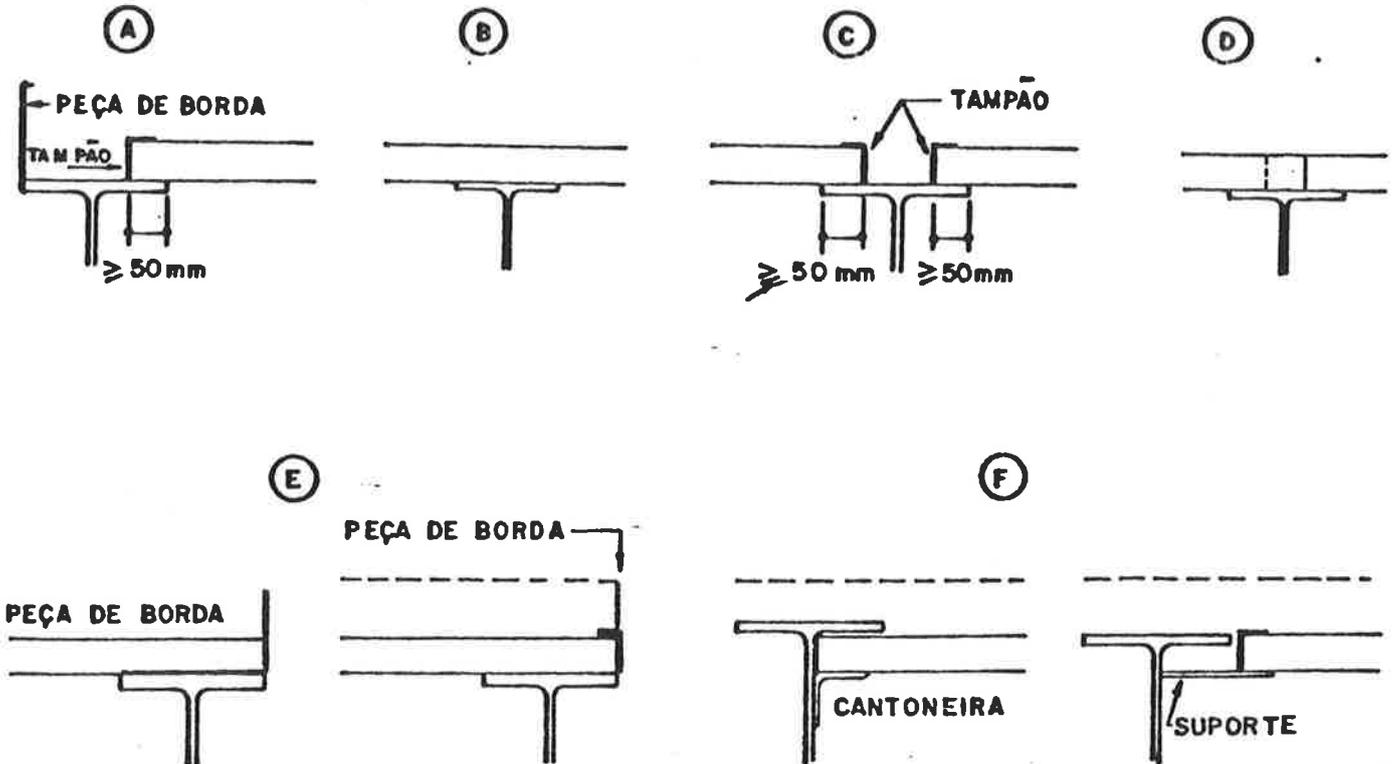


Figura 3.22 - Cuidados nos apoios longitudinais dos perfis em vigas de aço:

- a) extremidade (normal);
- b) continuidade da chapa sobre a viga intermediária;
- c) viga intermediária: perfis afastados ;
- d) viga intermediária: perfis de topo;
- e) extremidade (solução alternativa);
- f) laje rebaixada. (31)

Quando se deseja a continuidade da laje sobre o apoio, o eventual tampão não deve ser contínuo, devendo ser colocado em cada nervura, conforme ilustra a Figura 3.23.

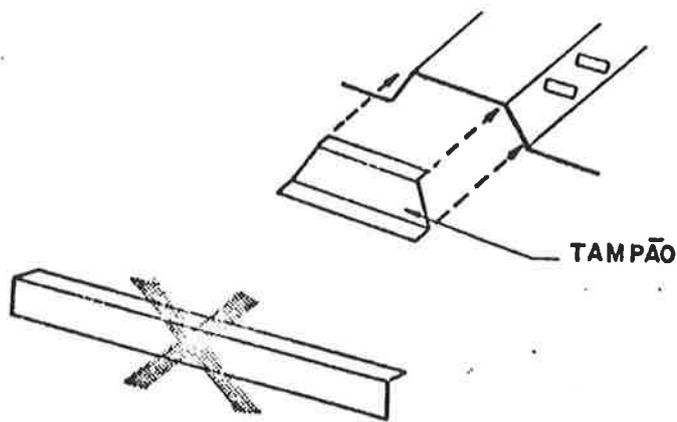


Figura 3.23 - Detalhes do "tampão". (31)

O posicionamento longitudinal relativo entre as duas chapas, que se encontram de topo conforme ilustrado em "3.22.d", é executado fazendo uso de calços de madeira (Figura 3.24) posicionados, num primeiro instante, entre as corrugações das chapas na região de contato. Com isso evita-se o encaixe inicial dos perfis antes do seu correto posicionamento, o que facilita a movimentação relativa até encontrar-se a locação definitiva.

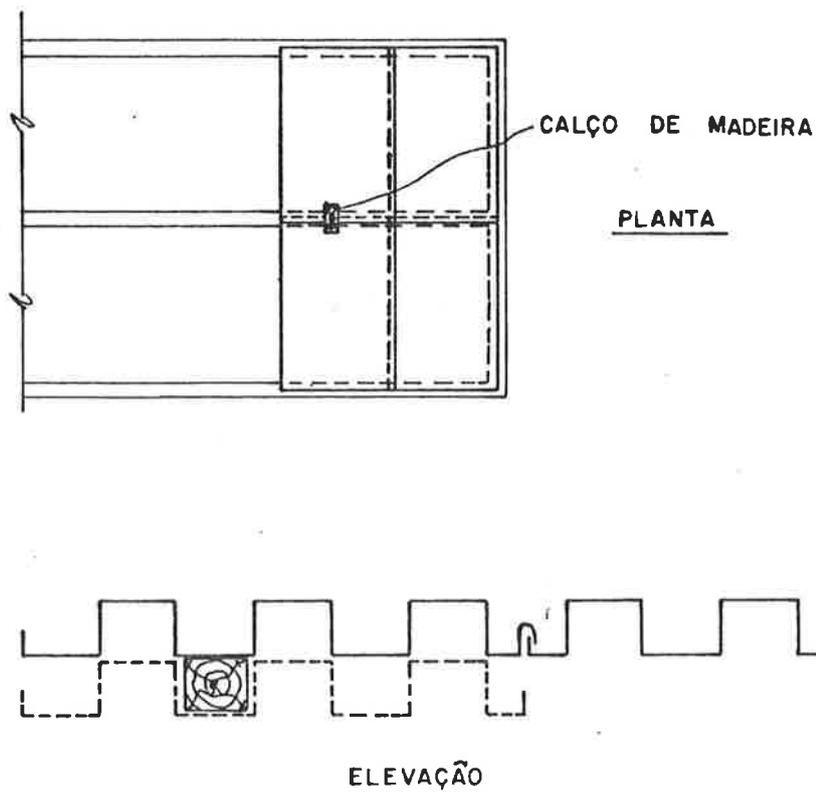


Figura 3.24 - Detalhe da execução do posicionamento de topo.

Quanto às vigas de concreto armado, caso estas sejam executadas previamente à deposição das chapas, o detalhamento quanto aos apoios longitudinais é basicamente o mesmo que o visto para as estruturas de aço. No caso de vigas executadas simultaneamente às lajes, pode-se pensar em detalhes especiais de forma que providenciem, principalmente, uma vedação das extremidades do componente quando da concretagem.

Existem no mercado internacional componentes denominados "end closed", que eliminam o problema da estanqueidade da extremidade (Figura 3.25).

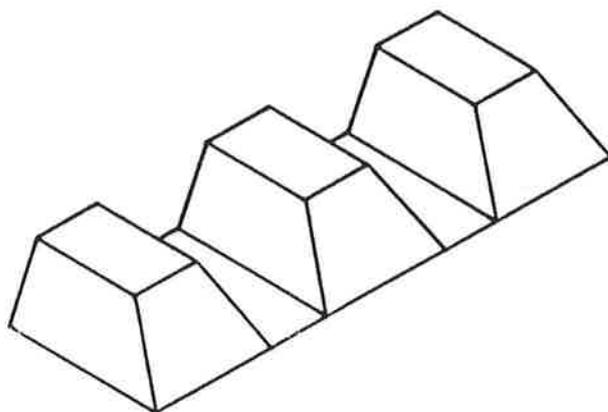


Figura 3.25 - Perfis "end closed".

A utilização de componentes complementares associados à outra borda da viga (que não a de apoio da chapa), são úteis para evitar-se o vazamento de concreto quando da execução da laje (Figura 3.26). Servem ainda como referência para o nivelamento superior da capa de concreto, bem como podem minimizar a tendência de ocorrência de deslizamento relativo concreto-chapa de aço.

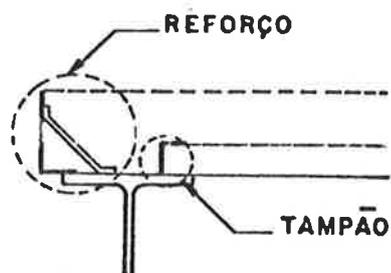


Figura 3.26 - Peça de borda externa. (31)

Os encontros de topo de duas chapas, conforme visto na Figura 3.22.d, devem ser feitos através de superposição adequada dos perfis (Figura 3.27.a) ou, quando isto não ocorrer, deve-se fazer uso de fitas adesivas para vedar eventual vazamento de nata.

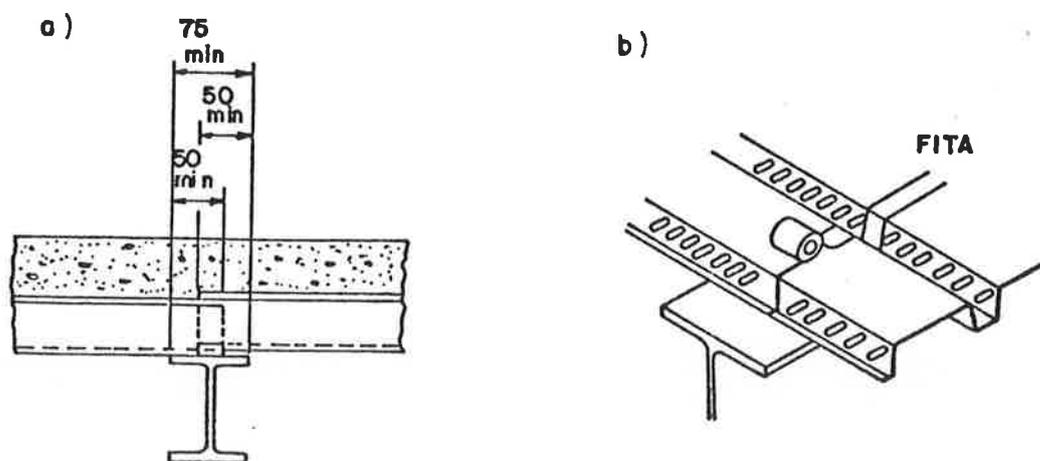


Figura 3.27 - Detalhes quanto ao encontro de topo: a) superposição adequada dos perfis; b) vedação com fita adesiva. (31)

Quanto aos apoios longitudinais às nervuras, na Figura 3.28 encontram-se recomendações relativas a vigas de aço.

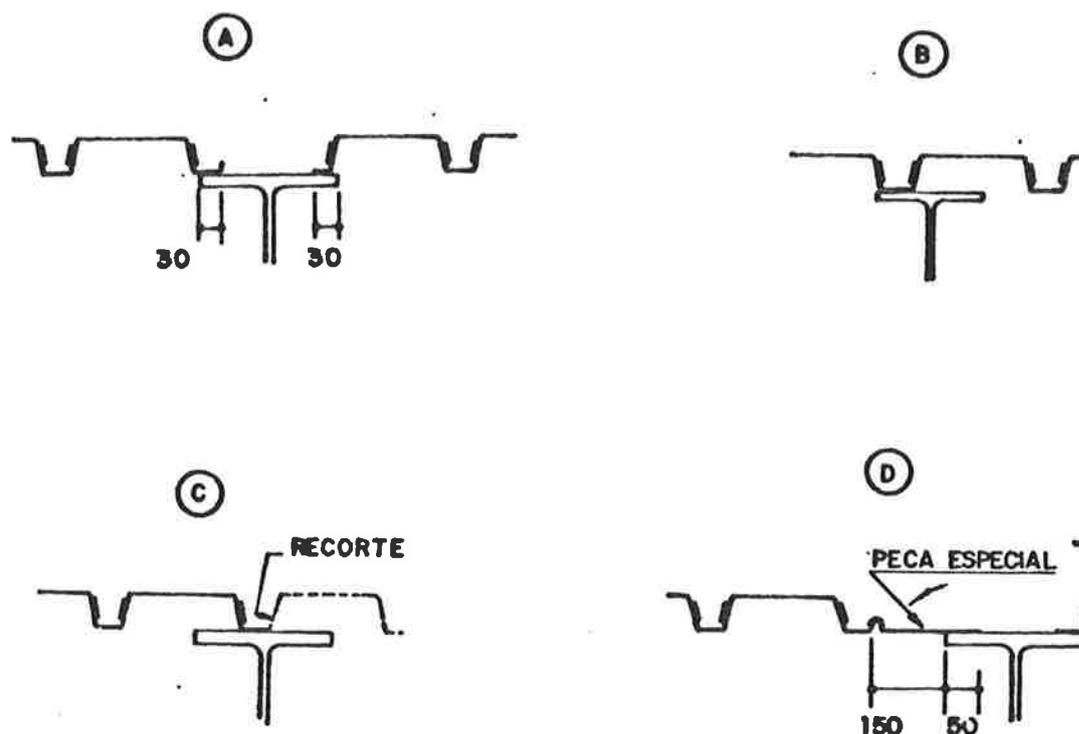


Figura 3.28 - Cuidados nos apoios longitudinais às nervuras:
a) perfis separados; b) perfil contínuo;
c) extremidade; d) peça complementar especial.
(31)

Valem os mesmos comentários quanto a vigas de concreto armado feitos quando da discussão dos apoios transversais.

Na montagem pode ser necessária a realização de recortes em locais especiais (Figura 3.29), como junto a pilares e a emendas de vigas.

Esses cortes devem ser feitos no próprio local, com o uso de disco de corte.

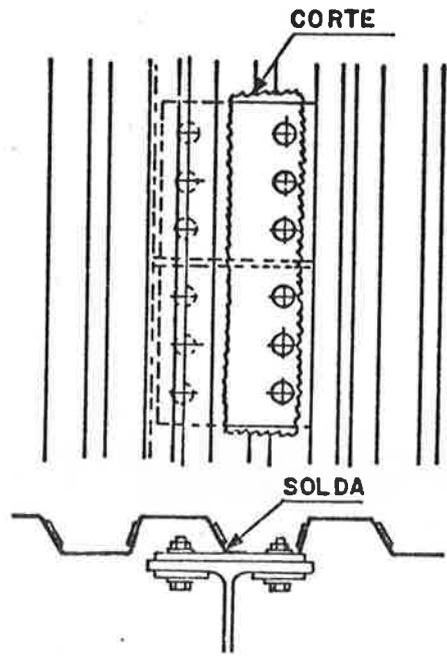
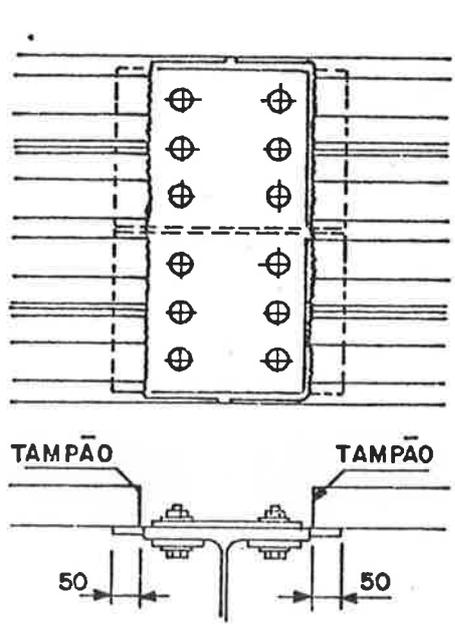
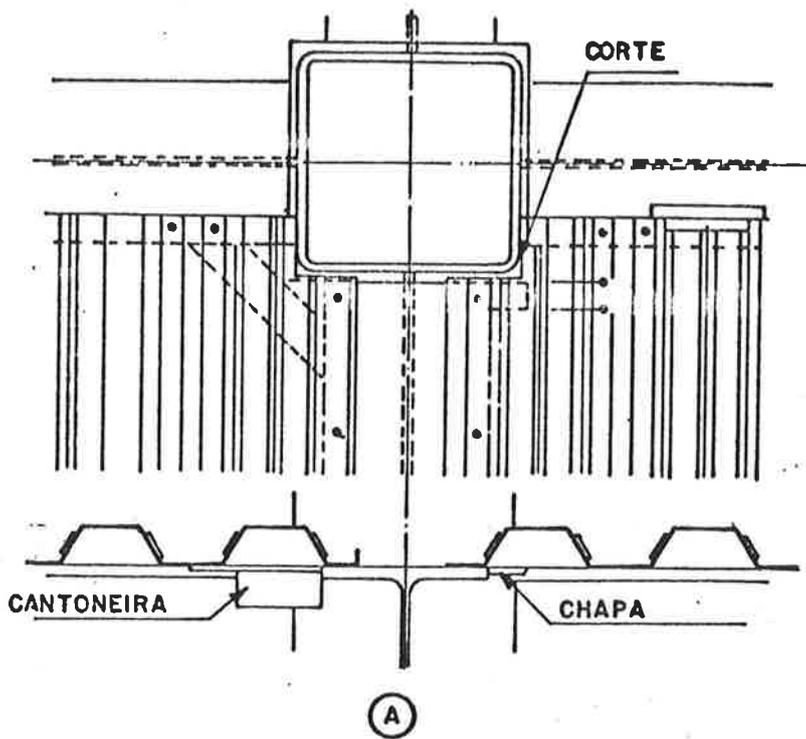


Figura 3.29 - Exemplos de recortes feitos nos perfis:
 a) junto a pilares; b) em emendas de vigas.
 (31)

3.6 SOLDAGEM

A soldagem dos perfis é uma etapa que merece especial atenção.

Conceitualmente, existem duas soldagens distintas: longitudinal e transversal às nervuras.

A soldagem longitudinal tem basicamente duas funções. A primeira delas é a de propiciar continuidade, fazendo com que perfis contíguos tenham a mesma deformação nas suas interfaces. A segunda é a de "selar" a ligação entre perfis, de modo a evitar que o concreto, ou mesmo a nata de cimento, venha a escorrer, ou que a ligação venha a abrir por hora da concretagem.

É normalmente feita a intervalos de 50 cm, através de pontos de solda. Uma solução alternativa pode ser a de se criar um detalhe no encaixe dos perfis que possa ser "mordido" por um alicate (Figura 3.30), resultando numa costura com comportamento semelhante ao da soldagem. O uso de rebites é também uma solução tecnicamente viável.

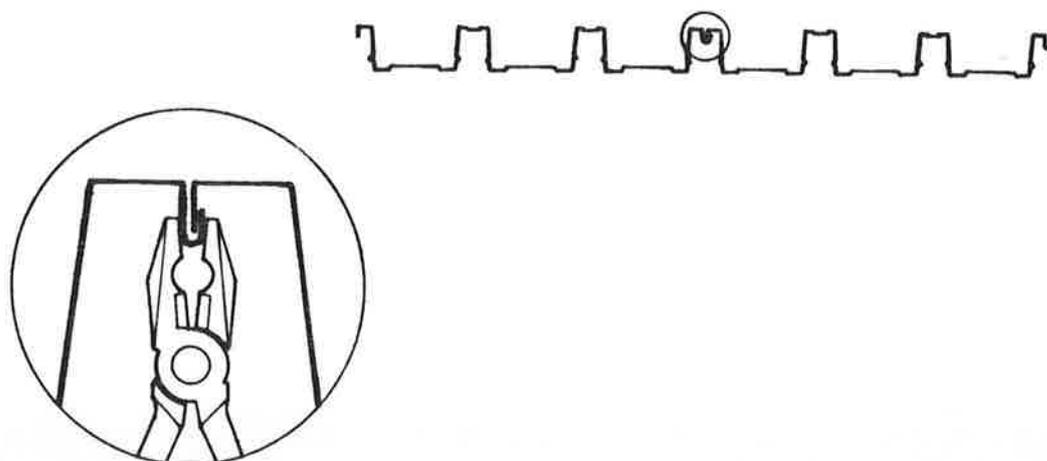


Figura 3.30 - Solidarização longitudinal dos perfis por meio de "mordeduras". (1)

Devido ao uso de chapas finas, da ordem de 1 mm, deve-se estudar cuidadosamente o processo de soldagem longitudinal para que não ocorra a sua perfuração. O processo de soldagem deve ser adequado para o aço que está sendo utilizado.

Já a soldagem transversal tem uma responsabilidade muito maior, pois é ela que permite a transferência de esforços horizontais para a viga através da laje composta.

Assim, cada onda deve ser soldada por solda de orifício com diâmetro de 25 mm, convenientemente executada e inspecionada.

Por fim, existe um terceiro tipo de soldagem, a executada longitudinalmente nos perfis externos. Essas são também responsáveis pela transferência de esforços horizontais e são normalmente feitas por solda de orifício ou de filete, a cada 600 mm, conforme ilustra a Figura 3.31.

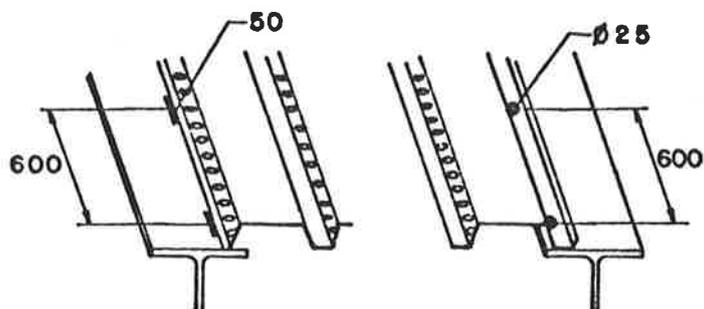


Figura 3.31 - Soldagem longitudinal dos perfis extremos.
(31)

No ato da montagem das chapas é bastante freqüente, nas referências estrangeiras, a recomendação de se ponteá-las durante a fase preliminar da montagem, executando a solda definitiva após o acerto final das chapas. Essa fixação preliminar é muito importante quanto a evitar-se deslocamentos devidos à ação do vento.

A Nittetsu (15), determinando os esforços de vento que atuariam sobre uma chapa dobrada posicionada a alturas de 100 m e 150 m em relação ao solo, chegou aos respectivos valores de 375 kgf/m² e 420 kgf/m². Determinando, através de ensaios, resistência de 540 kg por solda por ponto a arco com diâmetro de 12 mm, recomendou o uso de quatro pontos de solda para fixação de uma chapa dobrada de 3,20 m x 0,69 m.

3.7 ARMAÇÃO

É possível a presença de alguns tipos de armaduras adicionais na laje composta:

- armadura adicional para momentos fletores positivos, que poderia auxiliar a chapa de aço na resistência a estes esforços;
- armadura para momentos fletores negativos nos apoios internos das lajes, que cumpriram função não abrangida pela chapa de aço de propiciar continuidade às lajes;

- armadura de reforço nas regiões em que há cargas concentradas;
- armadura de reforço nas regiões em que há aberturas nas lajes;
- armadura adicional para melhorar o desempenho contra incêndio;
- armadura para minimizar a fissuração devida à retração e às variações de temperatura.

Eventualmente um único conjunto de barras pode cumprir concomitantemente várias dessas funções, bem como pode ocorrer a sua omissão no componente final.

A armadura de reforço deve ser especificada em aberturas para passagem de tubulações (furo quadrado ou circular), quando esta afeta a mesa inferior do perfil, como ilustra a Figura 3.32.a.

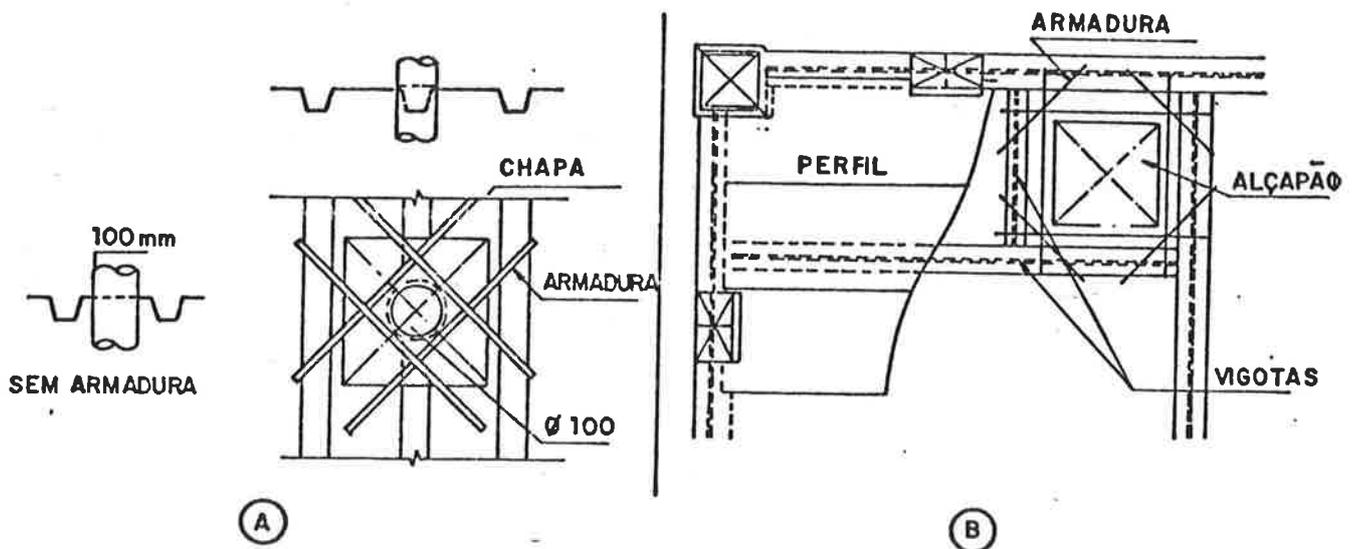


Figura 3.32 - Armaduras de reforços em aberturas: a) aberturas pequenas; b) aberturas grandes. (31)

Em aberturas maiores, que afetem mais de uma onda, como na ilustrada pela Figura 3.32.b, devem ser previstas vigotas de reforço, apoiadas nas vigas principais da estrutura, de forma a garantir o correto funcionamento da laje.

Com exceção da armadura de reforço, as demais devem, preferencialmente, ser executadas com telas metálicas eletrossoldadas, que permitem uma racionalização na execução compatível com o restante do processo.

Deve ser previsto o uso de espaçadores, bem como no caso de emendas de telas, deve haver uma superposição mínima das malhas, conforme ilustra a Figura 3.33.

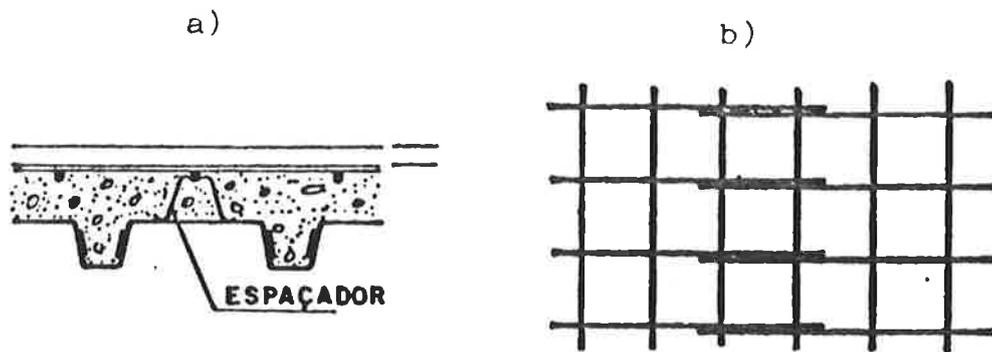


Figura 3.33 - Detalhes da armação: a) uso de espaçadores; b) superposição mínima da tela. (31)

Um outro detalhe passível de ser adotado é mostrado na Figura 3.34; as barras que fazem o papel de armadura transversal servem já como espaçadores para a armadura longitudinal adicional, que pode estar sendo acrescentada para melhorar o desempenho quanto a momentos fletores positivos ou quanto à resistência a fogo.

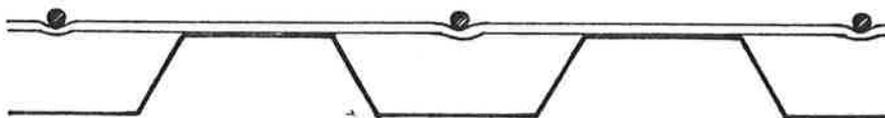


Figura 3.34 - Interação entre armaduras adicionais transversais e longitudinais.

3.8 CONCRETAGEM E CURA

A concretagem e a cura da laje composta pouco diferem da de uma laje tradicional. No entanto, alguns detalhes merecem destaque.

Primeiramente, é importante se fazer uma correta limpeza dos perfis metálicos antes da deposição do concreto. Nas lajes compostas é fundamental uma perfeita aderência entre a chapa

e o concreto, a qual pode ser prejudicada pela presença de poeira ou de lubrificantes (caso as chapas devam receber lubrificantes no seu processo de fabricação, estes devem ser voláteis, para que se evaporem antes da concretagem).

O sentido de lançamento do concreto deve ser compatível com a superposição lateral dos perfis, de forma a que não se incremente a tendência de abertura deste contato em função do impacto do material lançado (Figura 3.35).



Figura 3.35 - Importância do correto sentido de lançamento do concreto. (31)

O concreto utilizado deve ser corretamente dosado, de modo a se ter um diâmetro máximo de agregados e uma trabalhabilidade compatíveis com a forma geométrica do perfil. É comum a utilização de concretos com maiores valores de abatimento de tronco de cone ("slump").

A substituição das fôrmas tradicionais pela chapa de aço dobrada leva a menores probabilidades de vazamento de concreto e maior certeza na "cubicagem" do material (estimativa da quantidade necessária). Além disso, em função da redução, ou até mesmo da eliminação, da armadura de flexão positiva, diminui-se as interferências e favorece-se uma maior velocidade de concretagem (lançamento e adensamento do concreto). Esses aspectos favorecem a utilização de bombeamento, a utilização de concretos aditivados, entre outros recursos, no sentido de se otimizar a execução.

Estando situada na região inferior da laje, a chapa de aço pode ser considerada potencialmente favorável ao desenvolvimento de uma aderência adequada com o concreto; os riscos devidos à exsudação e concentração de vazios que pode ocorrer sob as barras de aço das lajes tradicionais desaparecem. No entanto, os cuidados para minimizar o contato de vibradores de agulha com a chapa de aço devem ser maiores, já que uma vibração excessiva desta num certo trecho pode ser prejudicial à aderência chapa-concreto em regiões próximas previamente adensadas.

O planejamento da concretagem deve ainda ser compatível com a concepção estrutural da laje composta. Seja o caso ilustrado na Figura 3.36.a, onde tem-se três vigas de apoio transversais às nervuras das chapas, sendo a viga EF intermediária aos componentes, propiciando o funcionamento como laje contínua. A concretagem no sentido ilustrado na Figura 3.36.b é favorável em relação ao representado na Figura 3.36.c já que, em qualquer momento da concretagem, a continuidade encontra-se mais fisicamente garantida.

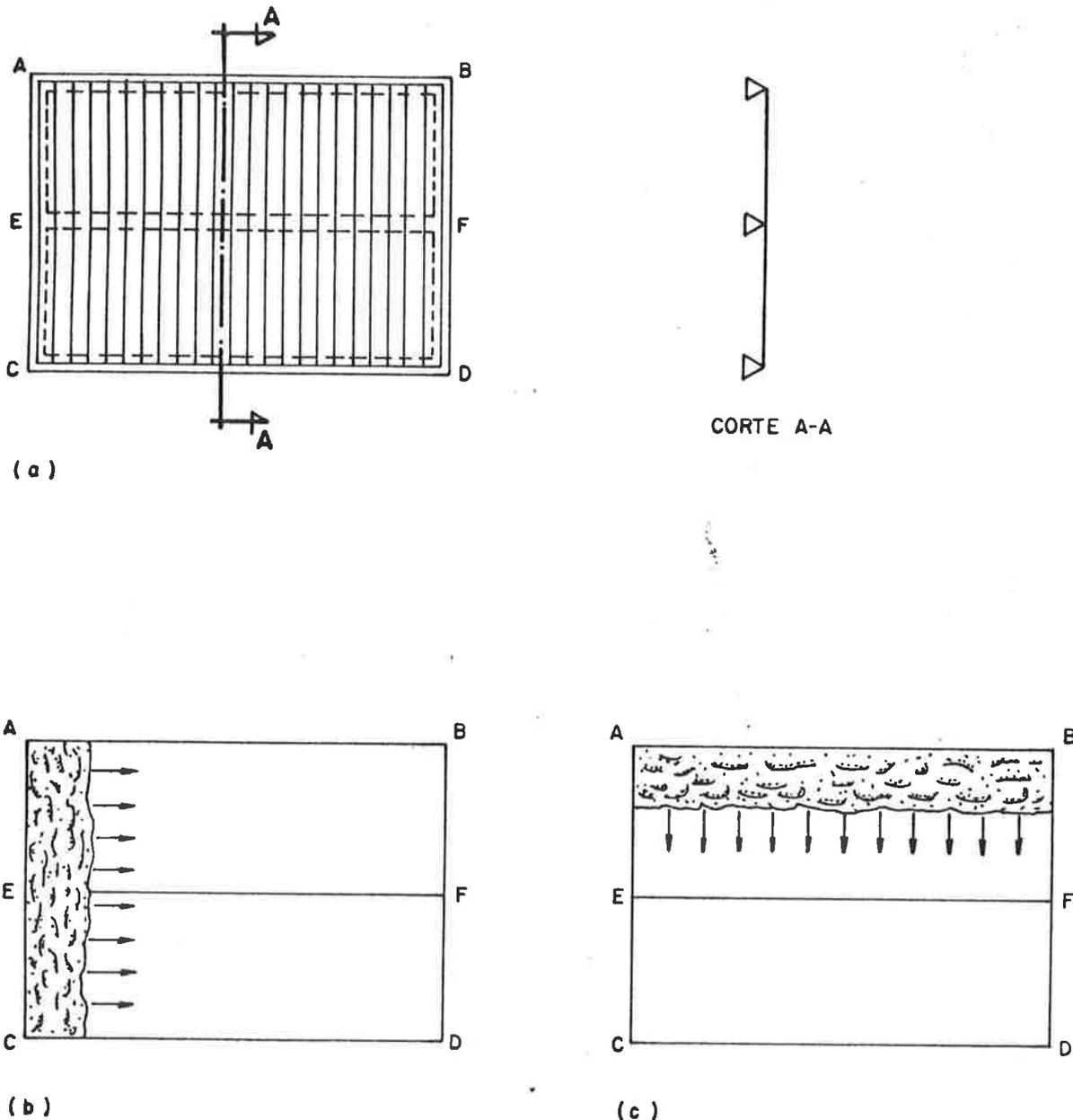


Figura 3.36 - Laje composta cobrindo a área representada pelas vigas AB, EF, CD, AC e BD: a) continuidade sobre a viga EF; b) concretagem no sentido A \rightarrow B; c) concretagem no sentido A \rightarrow C.

Quanto à cura das lajes compostas, a existência da chapa de aço na região inferior é favorável em relação às formas para lajes tradicionais quanto à menor perda de água por evaporação, e aparecimento de fissuras nesta região tracionada. Deve-se considerar no entanto que, em função da maior condutibilidade térmica do aço, em dias frios o processo de cura pode ser mais lento.

A retirada de eventuais escoramentos só deve se dar quando o concreto tiver atingido resistência suficiente para trabalhar em conjunto com a chapa.

No que tange à concretagem, resta ainda comentar algumas interferências com outros subsistemas, que levam à necessidade de se inserir componentes dentro da laje previamente ao lançamento do concreto.

A abertura das passagens de tubulações deve se dar após a concretagem. Para tanto, é feita uma moldura de madeira compensada com a forma da abertura a ser executada. Essa é depositada e amarrada sobre o perfil, sendo preenchida, por exemplo, com estopa ou serragem. Após a cura do concreto a estopa é retirada e a própria moldura serve como guia para a execução de um corte a gás conforme ilustra a Figura 3.37.

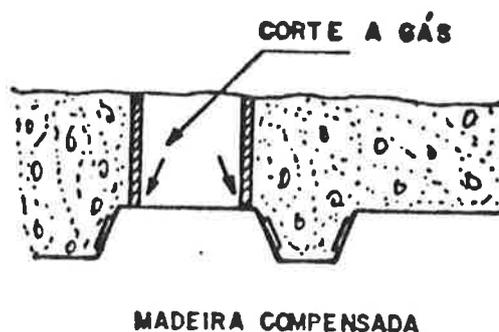


Figura 3.37 - Execução das passagens de tubulações. (31)

A previsão de peças embutidas para a fixação de forros facilita a execução destes e deve ser feita antes da concretagem da laje.

Apesar de ser mais interessante se correr com as tubulações e instalações de uma maneira geral sob o perfil, elas também podem ser executadas dentro do concreto. Nesses casos, deve-se evitar a passagem dentro das ondas, o cruzamento de tubulações e as tubulações de grandes diâmetros, como ilustra a Figura 3.38.

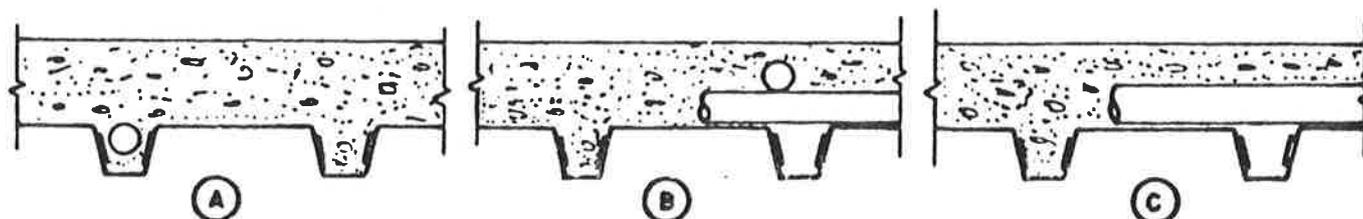


Figura 3.38 - Casos de passagens de tubulações embutidas a serem evitados: a) dentro da onda; b) cruzamento; c) grandes diâmetros. (31)

3.9 CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES QUANTO A EXECUÇÃO

Apresenta-se, sucintamente, algumas considerações quanto aos equipamentos, mão-de-obra e cronogramas envolvidos na execução da laje composta.

3.9.1 Equipamentos

Conforme pode-se observar pela sequência de etapas anteriormente apresentadas, a execução das lajes compostas não obriga ao uso de equipamentos especiais além dos tradicionalmente empregados nas construções.

Assim, os equipamentos necessários em cada etapa são:

- estocagem - empilhadeira, ou equipamento de içamento (guincho, grua, guindaste, etc), ou descarga manual;
- içamento - guincho de obra, ou elevador de obra, ou içamento manual, ou equipamento de montagem (grua, guincho, guindaste, etc);
- montagem - ferramentas tradicionais, máquina de corte a disco, máquina de corte à gás;
- soldagem - máquina de solda;
- armação - os mesmos de uma armação tradicional;
- concretagem - os mesmos de uma concretagem tradicional.

3.9.2 Mão-de-obra

Em função do pequeno número de utilizações da laje composta em nosso país, a estimativa da quantidade e produtividade da mão-de-obra pode basear-se nos dados relativos à montagem de coberturas com telhas metálicas. Deve-se observar, no entanto, as seguintes diferenças:

- tem-se em geral menores alturas com relação ao piso inferior;
- a superfície de montagem é horizontal;
- a fixação é por solda e não por ganchos ou parafusos.

Consultando-se um montador indicado pela empresa "Perkrom" por possuir experiência com a montagem da "formalaje", obteve-se o seguinte perfil para o serviço:

- equipe formada por 2 montadores, 2 soldadores e dois ajudantes;
- produtividade média diária desta equipe de 300 m².

3.9.3 Prazos de Execução da Laje

A utilização de lajes compostas pode permitir uma redução no tempo de execução, em relação ao processo tradicional, em consequência dos seguintes fatores:

- maior velocidade na montagem;
- redução ou eliminação da armação;
- redução ou eliminação dos escoramentos;
- redução ou eliminação da atividade de desforma .

Deve-se, no entanto, observar o reflexo que esta velocidade de execução das lajes pode ter quanto à execução da estrutura como um todo.

No caso de um edifício de concreto armado convencional, os pilares e as vigas podem tornar-se limitantes quanto à velocidade da confecção da estrutura. Possíveis formas de contornar o problema poderiam ser: a adoção de um maior número de jogos de forma para pilares e vigas ou a adoção de concretos com alta resistência inicial para a sua confecção.

No que tange à própria laje, seu escoramento no piso inferior implica em que este último já possua resistência

suficiente. Este problema pode ser contornado com a adoção de um número maior de jogos de escoramento de lajes, com a utilização de escoramento que se apoie diretamente nas vigas do próprio piso (vide Figura 3.12), ou através da adoção de chapas de aço dobradas que, para os vãos em questão, não necessitem de escoramento.

No caso da estrutura de aço não se tem as restrições indicadas para as estruturas moldadas de concreto armado. Se, aliado a este fato, adotar-se lajes compostas que não se apoiem nos pisos inferiores, pode-se conseguir resultados surpreendentes, viabilizando-se inclusive a moldagem concomitante de mais de uma laje.

3.10 INTERAÇÃO COM OS DEMAIS SUBSISTEMAS DO EDIFÍCIO

Discute-se, a seguir, alguns aspectos quanto à interação da laje composta com outros subsistemas do edifício. Passa-se por algumas discussões complementares às já tratadas quanto a:

- estrutura;
- vedações verticais e horizontais;
- instalações hidráulicas, elétricas e de ar condicionado;
- acabamentos e proteções.

3.10.1 Estrutura

As lajes compostas, fazendo parte da estrutura do edifício, em muito se relacionam com os pilares e as vigas. Alguns aspectos a destacar seriam:

- são eficientes em trabalhar como contraventamento horizontal do quadro formado pelas vigas de apoio;
- permitem a consideração de uma parcela sua como integrante da mesa de compressão das vigas de apoio, sejam estas de concreto ou de aço, caso em que a "viga mista" é conseguida através da utilização de conectores (Figura 3.39);
- na distribuição das cargas de piso para as vigas deve-se considerar o caráter de "armação em uma direção" das lajes compostas;
- podem impor modulação em função do aproveitamento máximo da largura das chapas.

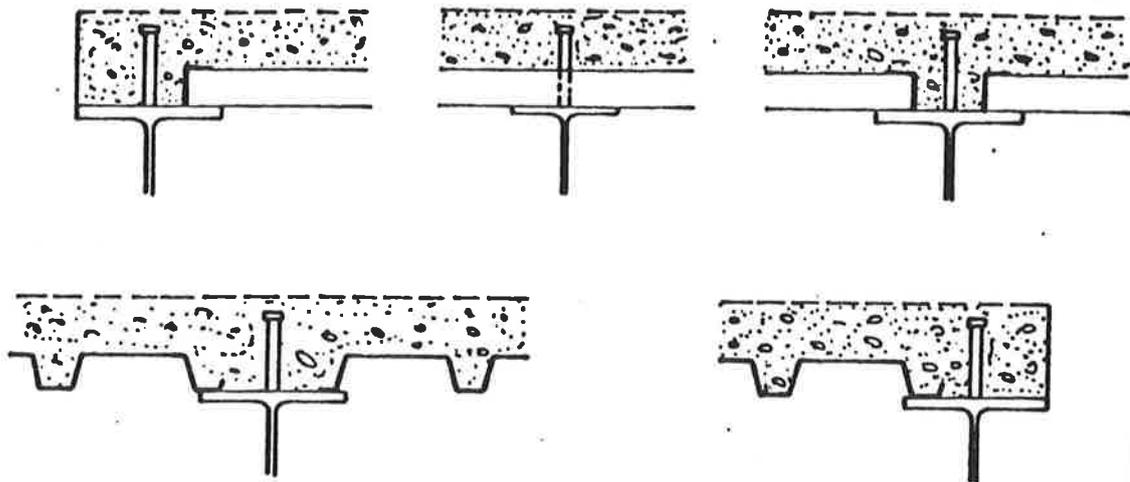


Figura 3.39 - Exemplos de uso de conectores para consecução de vigas mistas. (31)

A adoção de lajes compostas traz economia de barras de aço; no entanto, quanto ao consumo de concreto por unidade de área de piso, não se nota diferenças significativas em relação ao processo tradicional para aplicações corriqueiras. Com isto, o próprio peso da estrutura como um todo não sofre alterações significativas.

3.10.2 Vedações Verticais e Horizontais

Quanto às vedações verticais não situadas sob o vigaamento do piso, pode-se ter os seguintes problemas:

- a intersecção entre o fundo da laje e a vedação, quando esta não corre paralelamente às nervuras, necessita de arremate especial;
- mesmo quando situada sob as nervuras o arremate requer maiores cuidados que sob uma laje de face inferior plana;
- a carga concentrada devida à vedação pode implicar na necessidade de armadura adicional, o que introduz atividade extra no processo de execução das lajes.

A laje composta cumpre a função de vedação horizontal; apresenta ainda algumas facilidades quanto à adoção de forros-falsos, tais como a possibilidade de embutimento de componentes para fixação dos mesmos, seja previamente à concretagem (Figura 3.40.a) ou posteriormente a esta (Figura 3.40.b).

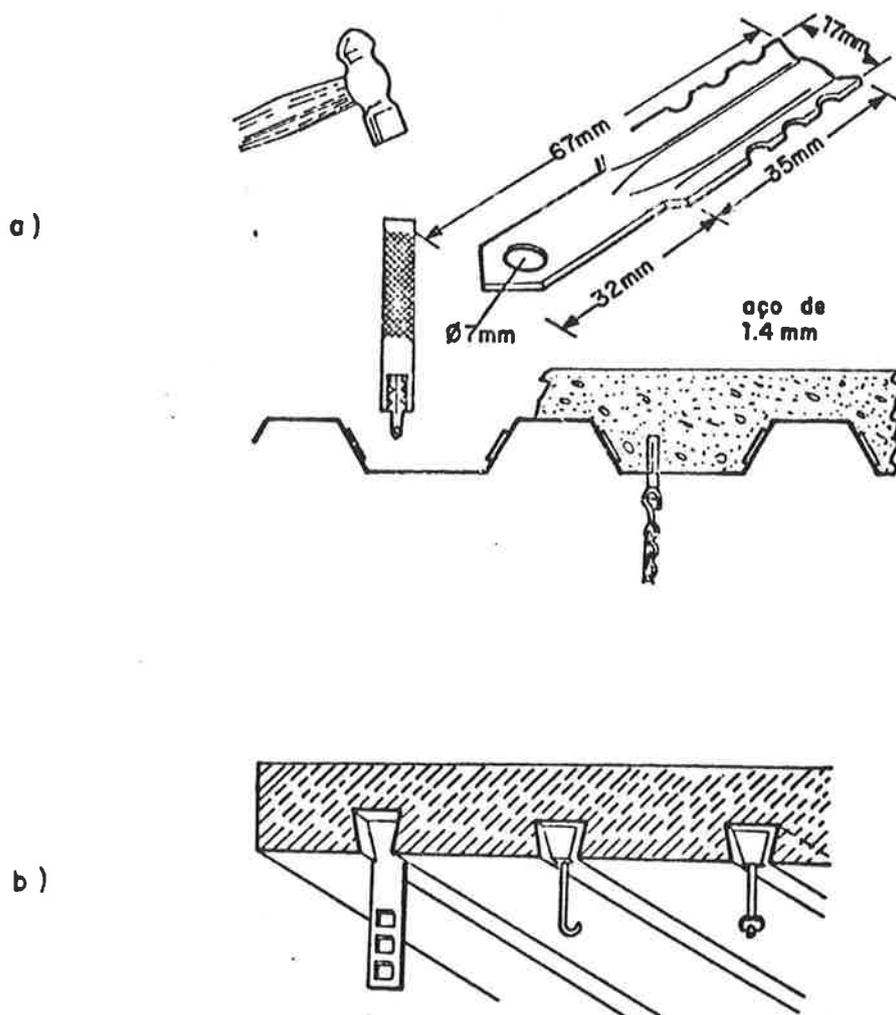


Figura 3.40 - Posicionamento de componentes para fixação de forros-falsos: a) previamente à concretagem; b) posteriormente à concretagem. (31)

Pode-se ainda deixar a chapa de aço aparente, perfazendo o próprio acabamento de forro. Neste sentido, a adoção de chapas pré-pintadas pode ser bastante interessante, devendo-se, no entanto, tratar adequadamente a questão de solidarização lateral dos perfis.

A laje composta, da mesma maneira que a laje de concreto armado comum, pode ser usada como componente de cobertura.

3.10.3 Instalações Hidráulicas, Elétricas e de Ar Condicionado

O uso das lajes compostas pode trazer alguns inconvenientes para as instalações hidráulicas, sobretudo as de esgoto. Alguns desses problemas já foram comentados e encontram-se ilustrados nas Figuras 3.32.a e 3.38.

Além disso, os ramais de esgoto normalmente se interceptam a 45°. Assim, eles obrigatoriamente devem se desenvolver por sob as nervuras, levando a uma perda na altura útil nos ambientes. Relembre-se, entretanto, da possibilidade de se fazer uso de lajes rebaixadas, conforme detalhe mostrado na Figura 3.22.f.

Mesmo em situações nas quais as tubulações corram dentro das nervuras, podem ocorrer problemas nos pontos de descontinuidade, como por exemplo junto a vigas nas quais as lajes apoiadas tenham as nervuras ortogonais entre si. Este aspecto é mais crítico nas instalações de esgoto, que apresentam maiores diâmetros.

Ao contrário das instalações hidráulicas, as elétricas e de ar condicionado se adaptam bem às lajes nervuradas, por serem mais flexíveis.

Por exemplo, a Figura 3.41 ilustra o aproveitamento das nervuras para a passagem das instalações elétricas e de condicionamento de ar, bem como para a colocação de luminárias.

De qualquer modo, elas também apresentam problemas nas descontinuidades, sobretudo as de ar condicionado.



Figura 3.41 - Instalações elétricas e de condicionamento de ar. (48)

Como alternativa mais econômica, pode-se utilizar forro apenas sob as nervuras que receberam a passagem de instalações.

3.10.4 Acabamentos e Proteções

O uso das lajes compostas pode levar à execução de acabamentos e proteções normalmente não necessários às lajes normais, sobretudo para evitar a oxidação do perfil e para melhorar sua capacidade de resistência ao fogo.

Esses aspectos, devido à sua importância com relação à segurança do edifício, serão tratados de forma específica nos próximos capítulos.

4. A PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO

Dentro do estudo da estabilidade dos materiais nas condições de serviço, o comportamento da chapa de aço dobrada quanto à corrosão merece um destaque especial.

Segundo Uhlig (49), a importância do estudo do fenômeno da corrosão pode ser vista sob três distintos aspectos: considerações econômicas, consecução de segurança e preservação dos recursos disponíveis.

No que tange às perdas econômicas associadas ao fenômeno, este mesmo autor as divide em diretas - associadas à reposição do material corroído - e indiretas, que podem abranger desde a interrupção de atividades desenvolvidas no ambiente que será reparado até a quantificação da necessidade de se proceder a um super-dimensionamento dos componentes para que seu eventual desgaste não comprometa o funcionamento normal.

Quanto à consecução de segurança, Tanaka (50) destaca, no cálculo das perdas devidas à corrosão, que "a mais importante seria a de vidas humanas".

No que se refere à conservação da energia, Uhlig (49) enfatiza que "o suprimento mundial de metais é limitado, e seu desperdício inclui as correspondentes perdas de energia e de reservas de água associadas à produção e fabricação de estruturas metálicas".

Uma idéia qualitativa das perdas econômicas envolvidas pode nascer das seguintes observações:

- Uhlig (49) afirma que as perdas diretas nos Estados Unidos estima-se, conservadoramente, alcançarem os 5,5 bilhões de dólares anuais, enquanto as indiretas, "mais difíceis de acessar, ... acrescentariam vários bilhões" a este montante;
- Adam (51) cita que as perdas devidas à corrosão na Inglaterra alcançam valores da ordem de 3,5% do seu "produto nacional bruto", enquanto estima que no Brasil, no ano de 1979, esses gastos seriam equivalentes aos ocorridos com a importação de petróleo;
- Tanaka (50), baseado em dados de 1973, indica que o "Brasil está perdendo, de maneira direta ou indireta, cerca de 270 ton/h, ou, na melhor das hipóteses, 204 ton/h de ferro e de suas ligas devido à corrosão. Esta cifra corresponde a 1/3 e 1/4, respectivamente, da produção anual de aço".

Quanto à questão da segurança, este fenômeno deve ser encarado com bastante seriedade no caso da laje composta. É interessante observar-se a classificação dos metais, citada por Uhlig (49), quanto à sua velocidade de corrosão, supondo uma corrosão uniforme, isto é, que vá consumindo toda a superfície do metal igualmente; eles são divididos em três classes;

- grande resistência à corrosão, quando a perda de espessura é menor que 0,005 polegadas/ano (0,013 cm/ano);
- satisfatórios, quando esta razão está entre 0,005 e 0,05 polegadas/ano (0,013 a 0,13 cm/ano);
- não satisfatórios, quando supera-se as 0,05 polegadas/ano (0,13 cm/ano).

Observa-se, portanto, que mesmo fazendo uso de um metal que perdesse 0,01 cm/ano, classificado portanto como de grande resistência à corrosão, ter-se-ia uma situação crítica quanto à laje composta, já que se estaria consumindo anualmente cerca de 1/10 da espessura da chapa de aço dobrada, que possui a função de reforço de tração do componente.

Portanto, tem-se um caso de material metálico, com função estrutural, eventualmente em contato direto com o meio ambiente, situação distinta do concreto armado convencional, onde o revestimento de concreto das barras de aço pode proporcionar uma barreira física e química para o processo.

Em vista da relevância do fenômeno passa-se, a seguir, a uma análise sucinta do mesmo para, posteriormente, poder-se discutir caminhos para a consecução de lajes compostas seguras.

4.1 O FENÔMENO DA CORROSÃO

Tanaka (50) compara corrosão a um desgaste do material que compromete a sua durabilidade; a define ainda como a "deterioração do material pela interação do meio com o mesmo, isto é: material + meio → produto da corrosão + energia".

Uhlig (49) já restringe a definição para os materiais metálicos, citando que "a corrosão é o ataque destrutivo de um metal por reação química ou eletroquímica com seu meio ambiente"; chama ainda a atenção para o fato de esta definição não abranger a deterioração por ações puramente físicas.

Adam (51) fornece indicações mais específicas ao afirmar que "corrosão é uma reação de superfície, espontânea, de oxidação, com desgaste do material".

Assumida esta última definição, ao se estudar a corrosão do aço se estará analisando a sua oxidação. Esta, por sua vez, pode se dar através de um processo direto, por ação direta do oxigênio do ar, caracterizando a corrosão química, ou através da corrosão eletroquímica, que envolve o fluxo de elétrons através de um meio material, necessitando da presença de um eletrólito para sua ocorrência.

Diz-se que "uma chapa de ferro com superfície polida exposta ao ar seco e na temperatura ambiente fica recoberta por uma finíssima película transparente de óxido" (52), mas que somente com elevação da temperatura, "por exemplo acima de 200°C, a reatividade já não é mais desprezível".

Helene (53) afirma ainda que "este tipo de corrosão - a oxidação direta - é extremamente lenta à temperatura ambiente e não provoca deterioração substancial das superfícies metálicas, salvo se existirem gases extremamente agressivos na atmosfera".

Masterton (54) diz que "o ferro exposto ao ar seco não é corroído", enquanto Uhlig (49) acentua que "os processos corrosivos são na maioria das vezes eletroquímicos".

Portanto, ao estudar a corrosão do aço, a atenção estará voltada para a ação de oxidação eletroquímica, em função de sua relevância ao ser confrontada com a oxidação direta.

4.1.1 Corrosão Eletroquímica

A corrosão eletroquímica do aço caracteriza-se por ser uma reação de oxi-redução que "só ocorre nas seguintes condições: deve existir um eletrólito, deve existir uma diferença de potencial, deve existir oxigênio e podem existir agentes agressivos" (53).

Trata-se basicamente da formação de uma célula galvânica, cujo mecanismo de ocorrência passa-se a abordar.

4.1.1.1 Reações de Oxi-Redução

As reações de oxi-redução são aquelas que "envolvem uma transferência total ou parcial de elétrons de uma espécie para outra" (54). Assim, nas duas reações:



e



indicadas por Masterton (54), ocorre uma troca de elétrons; na primeira, porém, esta troca é mais efetiva, ocorrendo uma formação de íons, enquanto na segunda o elétron de valência encontra-se apenas mais deslocado para o lado do cloro, que é mais eletronegativo, podendo ser atribuído a este em termos de número de oxidação.

Neto (55) apresenta três conceitos para explicar o fenômeno de oxi-redução:

- conceito clássico, segundo o qual a oxidação é o ganho e a redução é a retirada de oxigênio de uma substância;
- conceito em termos de elétrons, onde sua perda representa uma oxidação da substância, e um ganho associa-se à redução da mesma;
- conceito em termos de número de oxidação, em que um aumento deste representa uma oxidação, enquanto a redução implica numa diminuição do mesmo.

Quando um elemento cede elétrons deve haver um outro que os recebe; assim, uma reação de oxi-redução pode ser subdividida em duas semi-reações, uma de oxidação e outra de redução. Por exemplo, a primeira etapa da corrosão eletroquímica do ferro ou do aço em solução aquosa neutra pode ser representada pela seguinte reação de oxi-redução (54):



que pode ser subdividida nas seguintes semi-reações, respectivamente de oxidação e redução:



e



4.1.1.2 Célula Voltaica

O fenómeno da corrosão eletroquímica pode ser comparado ao funcionamento de uma célula voltaica. Enquanto numa célula eletrolítica (Figura 4.1) um fornecimento externo de energia eléctrica produz uma reacção não espontânea de oxi-redução, numa célula voltaica é a espontaneidade de uma reacção deste tipo que gera um fluxo de electricidade.

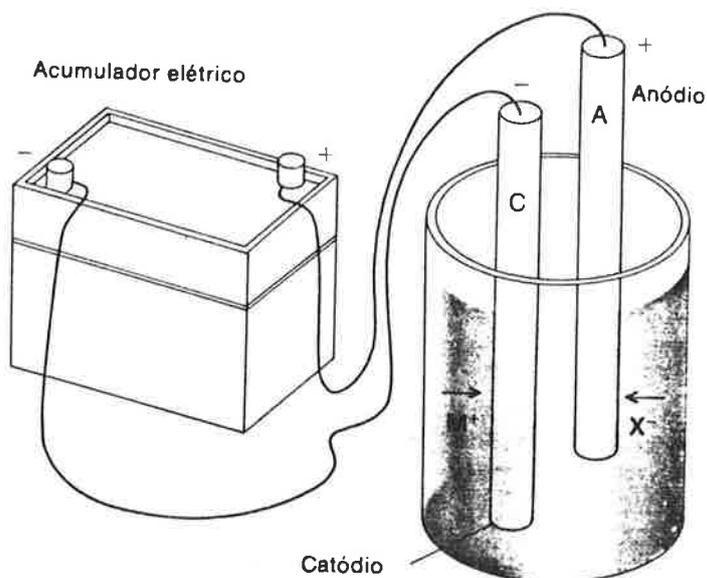


Figura 4.1 - Diagrama esquemático de uma célula eletrolítica.

Na célula eletrolítica mostrada a bateria atua como fornecedora de elétrons para o eletródio C (catódio) ao mesmo tempo em que os retira do eletródio A (anódio); para que se mantenha a neutralidade eléctrica, há que se estabelecer um processo de consumo de elétrons em C - redução do cátion M^+ - e um outro de geração em A - oxidação do ânion X^- .

Já na clássica célula voltaica de zinco e cobre, ilustrada na Figura 4.2, a maior tendência de se oxidar do zinco em relação ao cobre faz com que atue como anódio - eletródio em que ocorre oxidação - enquanto o cobre funcionará como catódio - eletródio em que ocorre redução.

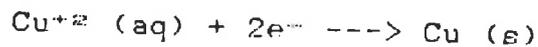
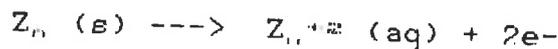
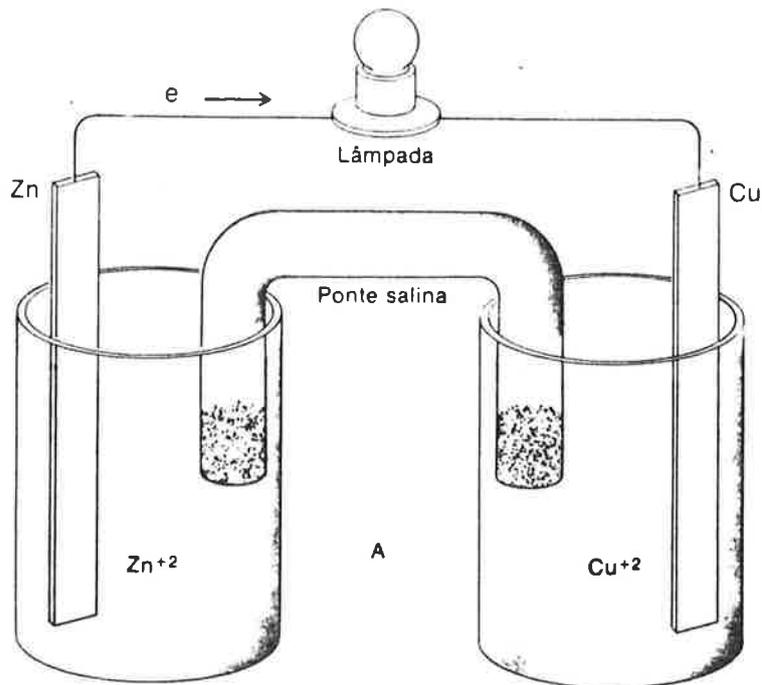
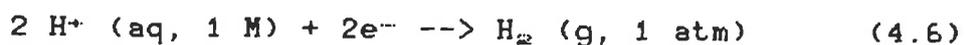


Figura 4.2 - Célula voltaica com eletrodos de zinco e cobre.

Para se inferir quando uma espécie terá caráter anódico ou catódico em relação a outra, foram desenvolvidas tabelas de potenciais de oxidação ou redução comparativas entre as espécies.

Um exemplo, transcrito na Tabela 4.1, é a tabela de potenciais-padrão de redução em solução aquosa a 25°C, em cuja obtenção procedeu-se às seguintes considerações:

- a voltagem padrão é obtida pela medição da diferença de potencial que se estabelece em uma célula galvânica em que todos os íons ou moléculas na solução estão numa concentração de 1 mol/litro, e todos os gases estão na pressão parcial de 1 atmosfera;
- para se poder tabelar os potenciais-padrão de redução (PPR) de uma semi-reação, adotou-se a redução-padrão do hidrogênio como referência, atribuindo-se à mesma um PPR = 0:

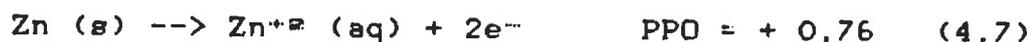


As semi-reações de redução possuem seus PPR determinados em relação ao do hidrogênio, ressaltando-se que a semi-redução inversa, de oxidação, possui um potencial-padrão de oxidação (PPO) que é igual em módulo ao PPR, com sinal invertido. A voltagem-padrão (E^\ominus) de qualquer célula é a soma algébrica do potencial-padrão de oxidação da espécie que está sendo oxidada com o potencial-padrão de redução da que está sendo reduzida.

Tabela 4.1 - Potenciais-padrão de redução em solução aquosa a 25°C. (54)

Semi-reação de redução	Potencial-padrão de redução (volts)
$\text{Li}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Li}(\text{s})$ -3,05
$\text{K}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{K}(\text{s})$ -2,93
$\text{Ba}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ba}(\text{s})$ -2,90
$\text{Ca}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ca}(\text{s})$ -2,87
$\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Na}(\text{s})$ -2,71
$\text{Mg}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mg}(\text{s})$ -2,37
$\text{Al}^{+3}(\text{aq}) + 3 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Al}(\text{s})$ -1,66
$\text{Mn}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mn}(\text{s})$ -1,18
$\text{Zn}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Zn}(\text{s})$ -0,76
$\text{Cr}^{+3}(\text{aq}) + 3 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Cr}(\text{s})$ -0,74
$\text{Fe}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Fe}(\text{s})$ -0,44
$\text{Cr}^{+3}(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Cr}^{+2}(\text{aq})$ -0,41
$\text{Cd}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Cd}(\text{s})$ -0,40
$\text{PbSO}_4(\text{s}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Pb}(\text{s}) + \text{SO}_4^{-2}(\text{aq})$ -0,36
$\text{Tl}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Tl}(\text{s})$ -0,34
$\text{Co}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Co}(\text{s})$ -0,28
$\text{Ni}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ni}(\text{s})$ -0,25
$\text{AgI}(\text{s}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ag}(\text{s}) + \text{I}^-(\text{aq})$ -0,15
$\text{Sn}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Sn}(\text{s})$ -0,14
$\text{Pb}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Pb}(\text{s})$ -0,13
$2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2(\text{g})$ 0,00
$\text{AgBr}(\text{s}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ag}(\text{s}) + \text{Br}^-(\text{aq})$ 0,10
$\text{S}(\text{s}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2\text{S}(\text{aq})$ 0,14
$\text{Sn}^{+4}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Sn}^{+2}(\text{aq})$ 0,15
$\text{Cu}^{+2}(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Cu}^+(\text{aq})$ 0,15
$\text{SO}_4^{-2}(\text{aq}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{SO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}$ 0,20
$\text{Cu}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Cu}(\text{s})$ 0,34
$\text{Cu}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Cu}(\text{s})$ 0,52
$\text{I}_2(\text{s}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{I}^-(\text{aq})$ 0,53
$\text{Fe}^{+3}(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Fe}^{+2}(\text{aq})$ 0,77
$\text{Hg}_2^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Hg}(\text{l})$ 0,79
$\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ag}(\text{s})$ 0,80
$2 \text{Hg}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Hg}_2^{+2}(\text{aq})$ 0,92
$\text{NO}_3^-(\text{aq}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 3 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{NO}(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}$ 0,96
$\text{AuCl}_4^-(\text{aq}) + 3 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Au}(\text{s}) + 4 \text{Cl}^-(\text{aq})$ 1,00
$\text{Br}_2(\text{l}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Br}^-(\text{aq})$ 1,07
$\text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 4 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ 1,23
$\text{MnO}_2(\text{s}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mn}^{+2}(\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O}$ 1,23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}(\text{aq}) + 14 \text{H}^+(\text{aq}) + 6 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Cr}^{+3}(\text{aq}) + 7 \text{H}_2\text{O}$ 1,33
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$ 1,36
$\text{ClO}_3^-(\text{aq}) + 6 \text{H}^+(\text{aq}) + 5 \text{e}^-$	$\rightarrow \frac{1}{2} \text{Cl}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2\text{O}$ 1,47
$\text{Au}^{+3}(\text{aq}) + 3 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Au}(\text{s})$ 1,50
$\text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 8 \text{H}^+(\text{aq}) + 5 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mn}^{+2}(\text{aq}) + 4 \text{H}_2\text{O}$ 1,52
$\text{PbO}_2(\text{s}) + \text{SO}_4^{-2}(\text{aq}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{PbSO}_4(\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{O}$ 1,68
$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ 1,77
$\text{Co}^{+3}(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Co}^{+2}(\text{aq})$ 1,82
$\text{F}_2(\text{g}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{F}^-(\text{aq})$ 2,87

Assim, para a reação que ocorre na célula ilustrada na Figura 4.2 tem-se:



$$E^{\circ} = 0,91 \text{ V}$$

o que confirma a sua espontaneidade; se $E^{\circ} < 0$ a reação proposta não é espontânea nas condições-padrão, havendo espontaneidade da reação inversa.

4.1.2 A Corrosão Eletroquímica do Aço

Observa-se que o aço, no estado seco ou em atmosfera seca, não corrói mas que, no entanto, exposto a uma solução aquosa neutra contendo um eletrólito tal como o Na Cl, dá origem à reação de oxidação-redução cujas semi-reações de oxidação e redução já foram descritas anteriormente nas equações (4.4) e (4.5). A formação da ferrugem - depósito escamoso de cor marrom avermelhada - surge de uma nova reação com o oxigênio:



Ao extrair-se um prego que ficou cravado em madeira por um certo tempo (Figura 4.3), nota-se que o depósito de ferrugem localiza-se em sua "cabeça", enquanto a parte corroída, característica de zona anódica, posiciona-se numa região intermediária do "corpo" do mesmo.

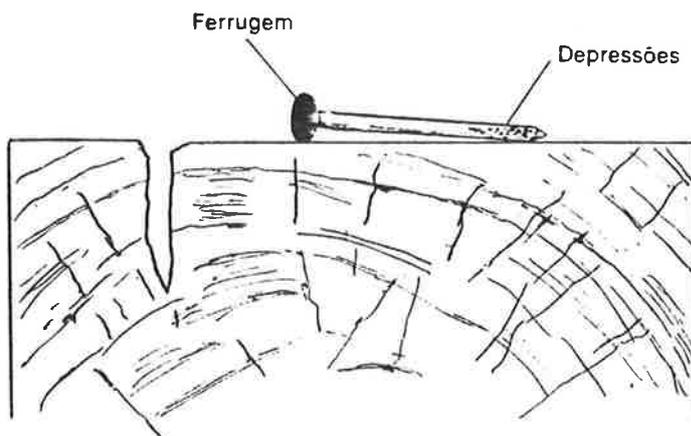


Figura 4.3 - Corrosão de um prego de aço introduzido na madeira.

Pode-se comparar o processo ocorrido com uma célula galvânica cujo catódio seria a região da cabeça onde, por uma maior disponibilidade de oxigênio, mais facilmente se estabelece a redução expressa em (4.5), bem como a formação de ferrugem expressa em (4.9); o anódio corresponde à zona corroída, onde tem-se a oxidação do ferro expressa em (4.4). Em função da formação de ferrugem na "cabeça", infere-se a necessidade de umidade, interligando os dois eletródios, para permitir que os íons Fe^{+2} , formados no anódio, cheguem ao catódio.

Enfim, na analogia com uma célula galvânica, tem-se os dois eletródios já citados, a solução aquosa é representada pela umidade, enquanto o material aço, constituinte do próprio prego, faz o papel de condutor elétrico externo (Figura 4.4).

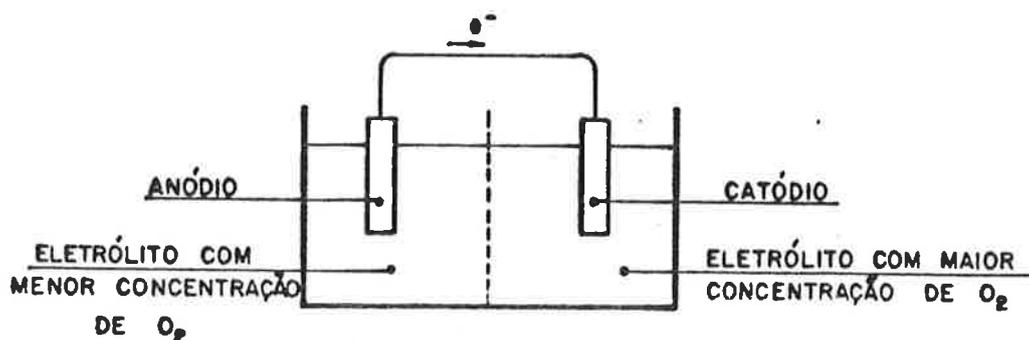


Figura 4.4 - Célula voltaica esquemática.

Para uma discussão das reações anódicas envolvidas, é interessante a observação do exemplo citado por Van Vlack (56). Seja a célula voltaica mostrada na Figura 4.5, onde o ferro é o anódio e o catódio é representado por um "eletrodo de hidrogênio" (hidrogênio borbulhado em tubo de platina). A reação total, combinação das equações (4.3) e (4.9), é dada por:



Para meios ácidos a redução no catódio é dada por:



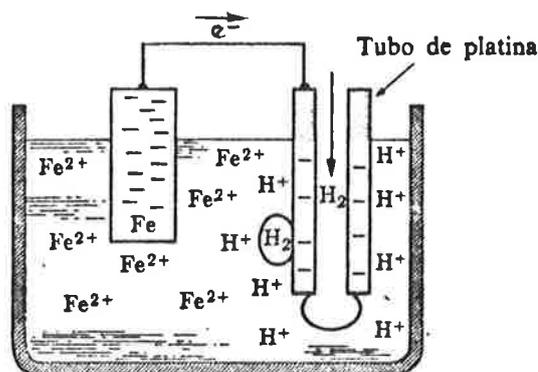


Figura 4.5 - Célula voltaica ferro-hidrogênio. (56)

A medida em que a reação se desenvolve ocorre um consumo dos íons hidrogênio e, para que se mantenha o equilíbrio da reação de dissociação da água, expressa por:



ocorre um deslocamento da reação desta equação para a direita, no sentido de maior produção de OH^- , o que permite a formação de ferrugem na presença de íons Fe^{2+} , que se difunde mais facilmente até o cátodo que a hidroxila para o ânodo.

Conforme foi visto, em uma solução neutra aerada, ou com a própria presença de oxigênio em meios ácidos, "acelera-se a corrosão no ânodo" (57), na medida em que a reação expressa em (4.5), além da produção de hidroxilas, propicia remoção de elétrons do cátodo.

Helene (53) cita ainda que "a corrosão pode ser acelerada por agentes agressivos" tais como os íons sulfetos (S^{2-}), cloretos (Cl^-), nitritos (NO_2^-), dióxido de carbono (CO_2), etc.

4.1.3 O Estabelecimento do Processo Corrosivo

Os potenciais padrão de redução apresentados na Tabela 4.1 representam uma situação bastante particular do problema.

Na verdade, ao se mergulhar um metal em um solvente como a água, existirá uma tendência dos seus íons passarem para a solução (55):



A medida em que os íons abandonam o metal, vai-se aumentando a carga negativa do mesmo em função da permanência dos elétrons; gera-se então uma atração eletrostática sobre os íons, provocando-se a formação de uma "dupla camada elétrica" (Figura 4.6), gerando-se uma diferença de potencial entre o metal e a solução, que é o chamado potencial de eletrodo.

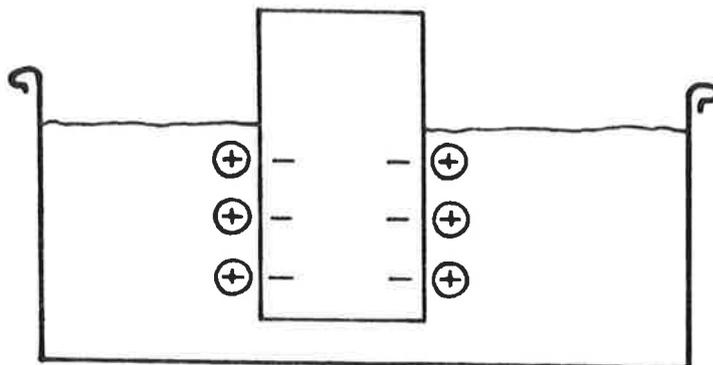


Figura 4.6 - Esquema simplificado da interação do metal com o eletrólito.

A situação de equilíbrio se dá quando a tendência de dissolução é contrabalançada pela atração eletrostática citada. Fica claro, portanto, que inúmeros fatores, como por exemplo a concentração dos íons na solução, vão influir no estabelecimento do potencial de eletrodo. Mais que isto, durante o funcionamento de uma célula voltaica, as condições iniciais, quando a corrente é nula ($i=0$), são alteradas até uma nova situação de equilíbrio, quando se estabelece a corrente de corrosão i_{corr} .

Tanaka (50), fazendo uso da equação proposta por Nernst, indica que, se a concentração do íon Me^{+n} na condição de equilíbrio inicial ($i=0$) é $[Me^{+n}]_{i=0}$, então o potencial de equilíbrio neste instante, a $25^{\circ}C$, é dado por:

$$E_{i=0} = E_0 + \frac{0,0592}{n} \log [Me^{+n}] \quad (4.14)$$

Durante o estabelecimento do equilíbrio no funcionamento de uma célula voltaica, "a experiência mostra que o potencial catódico de oxidação diminui e o potencial anódico de oxidação aumenta. A este fenômeno denomina-se polarização do eletrodo, e pode ser esquematizado num diagrama, denominado "Diagrama de Evans" (50), conforme ilustra a Figura 4.7.

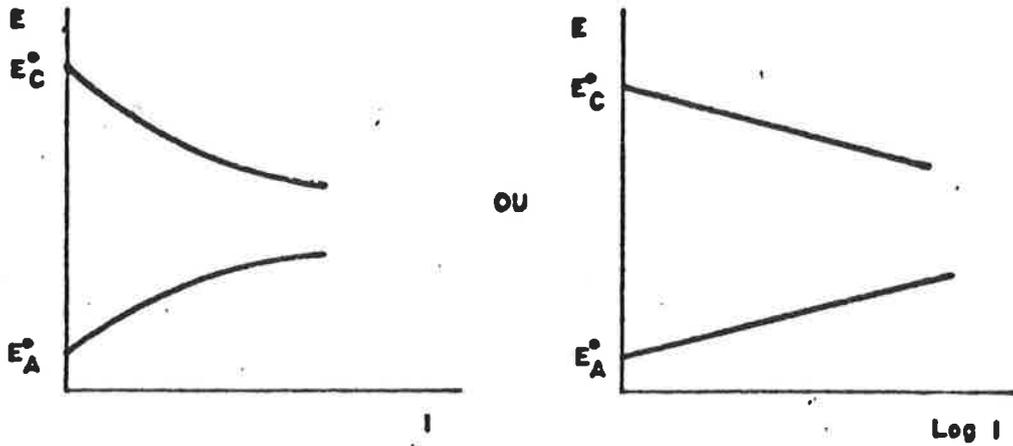


Figura 4.7 - Curvas esquemáticas de polarização. (50)

A corrente de corrosão (I_{corr}) - bem como o potencial de equilíbrio do fenómeno - vai nascer de uma solução de compromisso entre as já citadas polarizações do catódico e do anódico e, ainda, a queda de potencial verificada em função da resistência elétrica do próprio eletrólito. A Figura 4.8, proposta por West (57), ilustra o estabelecimento das condições da corrosão.

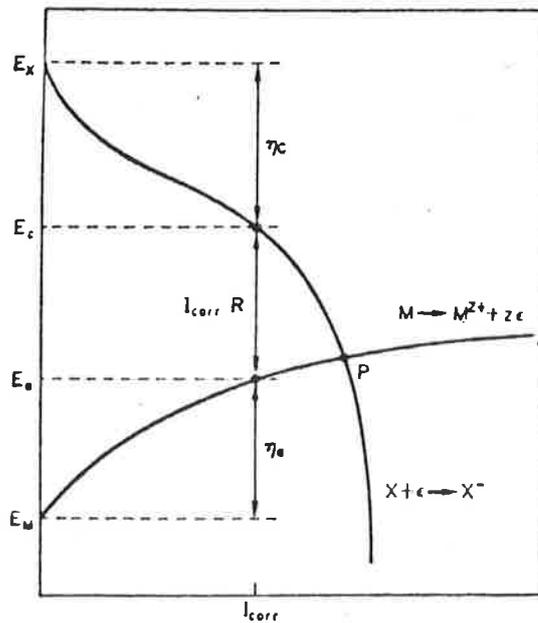


Figura 4.8 - Corrosão em eletrólito com apreciável resistência elétrica. (57)

Observe-se que se a resistência do eletrólito pudesse ser considerada desprezível, a corrente estabelecida seria a correspondente ao ponto P da Figura 4.8. Esta observação serve para ilustrar um dos motivos pelos quais, em ambientes marinhos, tem-se uma aceleração da corrosão: a presença de sais solúveis, do tipo do NaCl, propiciam a formação de eletrólitos altamente condutores.

No que tange ainda à variação do comportamento dos eletrodos com o tempo, "existem certos metais cuja velocidade de corrosão diminui com o tempo, e em alguns casos torna-se tão pequena que pode ser considerada desprezível" (50). A curva de polarização para estes metais, ditos apassiváveis, é mostrada na Figura 4.9, onde nota-se que, para potenciais mais elevados, a corrente de corrosão torna-se bastante reduzida.

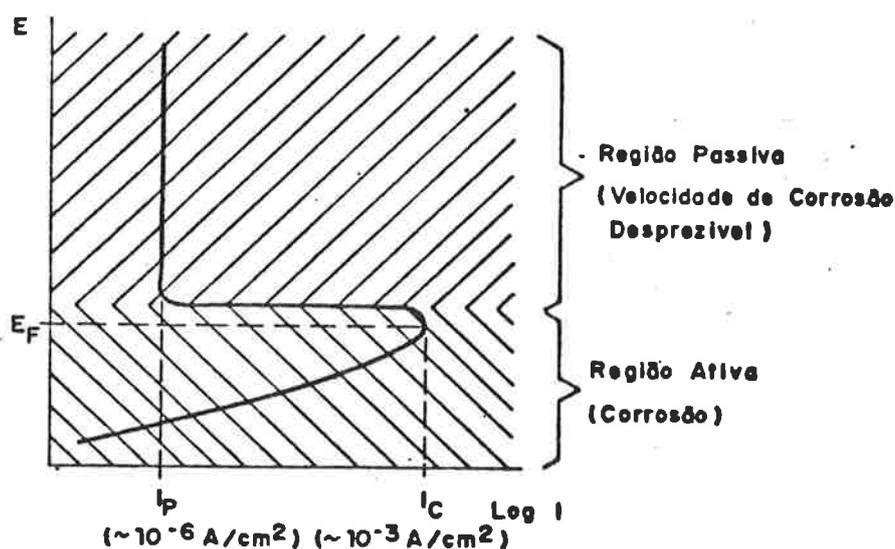


Figura 4.9 - Curva esquemática de polarização dos metais apassiváveis. (50)

"Nestes metais os produtos de corrosão, normalmente óxidos, têm propriedades protetoras no que respeita a corrosão" (50). O ferro é um material que apresenta condições de apassivação.

Wranglên (58) indica que "fazendo uso de dados termodinâmicos e da equação de Nernst para potenciais de eletrodo é possível obter as fronteiras das regiões dentro das quais o metal isoladamente ou alguns de seus compostos são estáveis".

Uhlig (49) cita que "M. Pourbaix confeccionou um sumário compacto de dados termodinâmicos na forma de diagramas relacionando potencial e o pH, que se relacionam ao comportamento eletroquímico e corrosível de qualquer metal em água".

Um diagrama desse tipo para o ferro é apresentado por Wranglên (58), conforme mostrado na Figura 4.10.

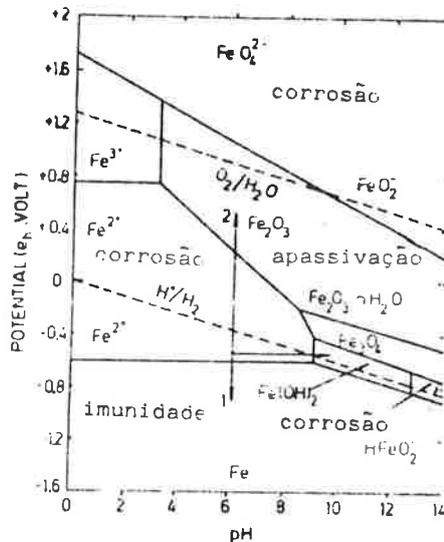


Figura 4.10 - Diagrama potencial - pH para o ferro, para concentração dos íons de 10⁻⁶ átomos-grama por litro, a 25°C. (58)

Em cada uma das regiões delimitadas existe um produto que é considerado estável. Wranglên (58) cita ainda que "se as condições são tais que o metal é a fase estável, existe um estado de imunidade", isto é, a corrosão é desprezível. "Sob certas condições, no entanto, um composto do metal muito pouco solúvel pode formar um filme protetor sobre sua superfície, tornando a velocidade de corrosão extremamente baixa. O metal então encontra-se num estado de passividade". Wranglên (58) destaca que os diagramas são usualmente construídos para temperaturas de 25°C e uma concentração do íon metálico de 10⁻⁶ moles por litro de solução" já que "se a concentração do íon metálico na solução é menor, considera-se não ter havido corrosão".

West (57) apresenta um diagrama de Pourbaix com as várias linhas numeradas (Figura 4.11.a) fornecendo as condições que lhes deram origem, conforme transcrito abaixo. Na Figura 4.11.b tem-se ainda um outro diagrama esquemático do mesmo autor, onde se dá um destaque visual para as várias condições possíveis.

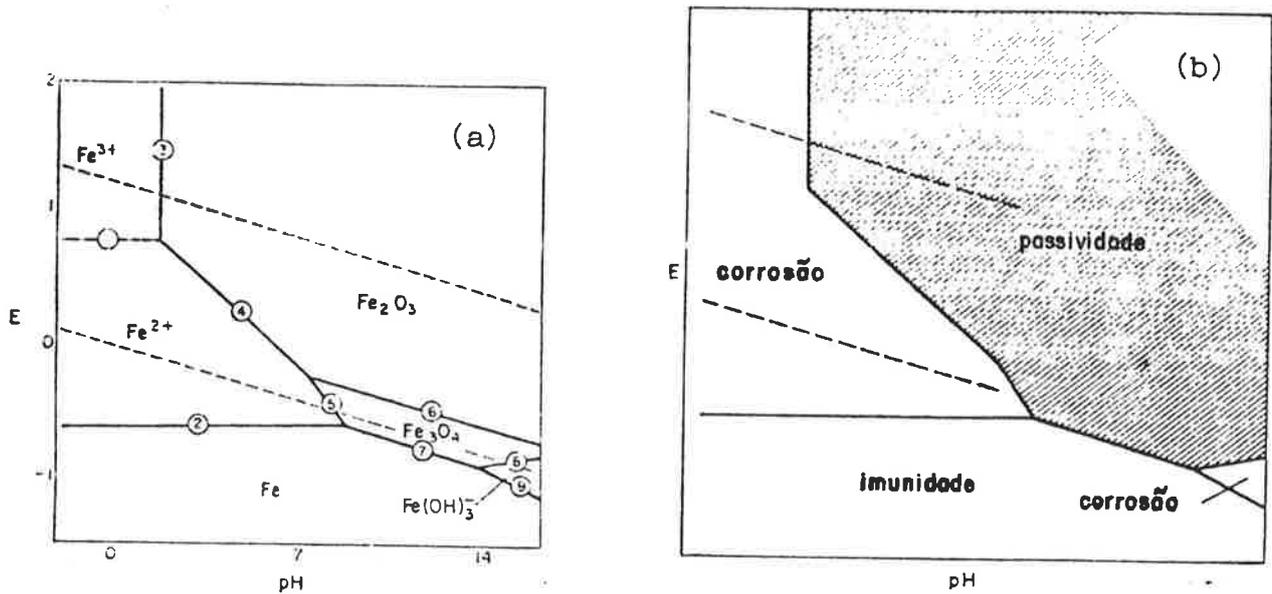


Figura 4.11 - Diagrama de Pourbaix para o ferro: a) sistema Fe - H₂O a 25°C, considerando a passivação pelo Fe₃O₄ e Fe₂O₃ e assumindo uma concentração iônica total de 10⁻⁴ M; b) domínios do comportamento do ferro à corrosão; o ponto A representa as condições mais frequentemente encontradas na corrosão atmosférica.

As linhas horizontais refletem o equilíbrio de reações de oxidação-redução que sejam independentes do pH:

- linha (1)



$$E = 0,77 + 0,059 \log \frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} \quad (4.16)$$

- linha (2)



$$E = 0,44 + 0,029 \log [\text{Fe}^{2+}] \quad (4.18)$$

As linhas inclinadas representam equilíbrios que envolvem tanto troca de elétrons quanto a concentração de íons hidrogênio:

- linha (4)



$$E = 0,73 - 0,177 \text{ pH} - 0,059 \log [\text{Fe}^{2+}] \quad (4.20)$$

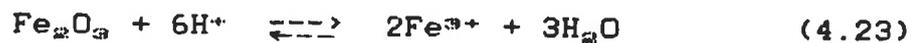
- linha (5)



$$E = 0,98 - 0,236 \text{ pH} - 0,088 \log [\text{Fe}^{2+}] \quad (4.22)$$

As linhas verticais representam equilíbrios que não envolvem troca de elétrons:

- linha (3)



Como a constante de equilíbrio desta reação é $K_a = \frac{[\text{Fe}^{3+}]^2}{[\text{H}^+]^6}$,
pode-se chegar a:

$$\log \text{Fe}^{3+} = \frac{1}{2} \log K_a - 3 \text{ pH} = - 0,45 - 3 \text{ pH} \quad (4.24)$$

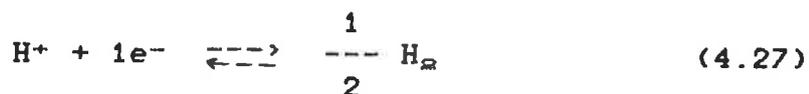
Resta comentar a respeito das linhas pontilhadas, que representam o equilíbrio entre: água e oxigênio (linha superior) e água e hidrogênio (linha inferior):

- linha superior



$$E = 1,23 - 0,059 \text{ pH} \quad (4.26)$$

- linha inferior



$$E = 0,00 - 0,059 \text{ pH} \quad (4.28)$$

Wranglên (58) cita que "existem três diferentes caminhos para remover o metal da região de corrosão" (vide Figura 4.10):

- abaixando o potencial de eletrodo até levá-lo à condição de imunidade, processo denominado proteção catódica;

- elevando o potencial de eletrodo até uma região de passividade, processo denominado proteção anódica;
- aumentando o pH (ou a alcalinidade) da solução, o que pode levar também à formação de um filme apassivador.

Ao fazer uso de um Diagrama de Pourbaix há que se atentar, no entanto, para uma série de limitações existentes:

- "na medida em que se trabalha com dados termodinâmicos, eles nada informam quanto à velocidade de corrosão, isto é, se uma reação indicada como possível se processa rapidamente ou vagarosamente" (49);
- não se pode discernir, a partir da termodinâmica, se um produto de corrosão propicia apassivação do metal; segundo Wranglên (58) há que se proceder a experimentos complementares para se tirar esta conclusão;
- "os dados indicam as condições para as quais uma barreira protetora pode ser formada sobre o eletródio, mas não propiciam nenhuma medida sobre quão eficazes essas barreiras podem ser na presença de íons específicos tais como SO_4^{2-} e Cl^- " (49);
- também "não indicam as condições sob as quais barreiras formadas por compostos não-estequiométricos do metal são possíveis" (49), as quais podem ser importantes quanto à redução da velocidade de corrosão.

Uhlig (49) termina afirmando que, empregados com estas limitações em mente, estes diagramas podem ser muito úteis.

4.1.4 Classificação do Processo Corrosivo

A corrosão dos metais pode ser classificada de diferentes maneiras. Discutir-se-á sucintamente as seguintes: segundo o tipo de célula formada no processo eletroquímico; segundo a morfologia da região atacada do metal; segundo o meio agressivo presente.

4.1.4.1 Tipos de Células de Corrosão

Segundo Uhlig (49), há três principais tipos de células que tomam parte de reações de corrosão: células de eletrodos distintos, células de concentração e células de temperatura diferencial.

A primeira delas pode surgir, segundo Van Vlack (56), em função de diferenças de composição (por exemplo dois metais distintos colocados em contato) ou de diferenças de energia ao longo de um mesmo metal com origem em submissão a diferentes tensões, características diferentes ao longo da micro-estrutura do material, etc.

Nas células de concentração, a diferença de potencial entre duas regiões de um mesmo material surge em função de diferenças no eletrólito circunvizinho; como exemplo (Figura 4.12), uma região com maior concentração de oxigênio pode atuar como catódio em relação à região onde o mesmo é mais escasso.

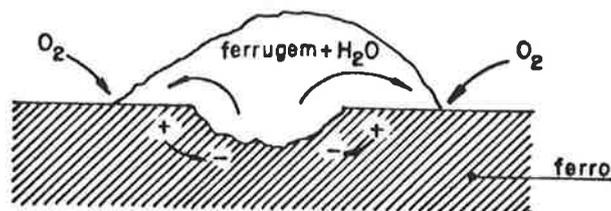


Figura 4.12 - Célula de aeração diferencial formada pelo depósito de ferrugem sobre o ferro.

Nas células de temperatura diferencial, a diferença de potencial pode surgir devido a diferenças de temperatura ao longo de um mesmo eletrólito em contato com um material único.

4.1.4.2 Tipos de Danos Causados pela Corrosão

"Em termos da aparência externa ou da alteração de propriedades físicas do metal" (49), pode-se classificar a corrosão em (59):

- corrosão uniforme (Figura 4.13.a);
- corrosão em placas (Figura 4.13.b);
- corrosão por pites (Figura 4.13.c);
- corrosão intergranular (Figura 4.13.d);
- corrosão sob-tensão (Figura 4.13.e).

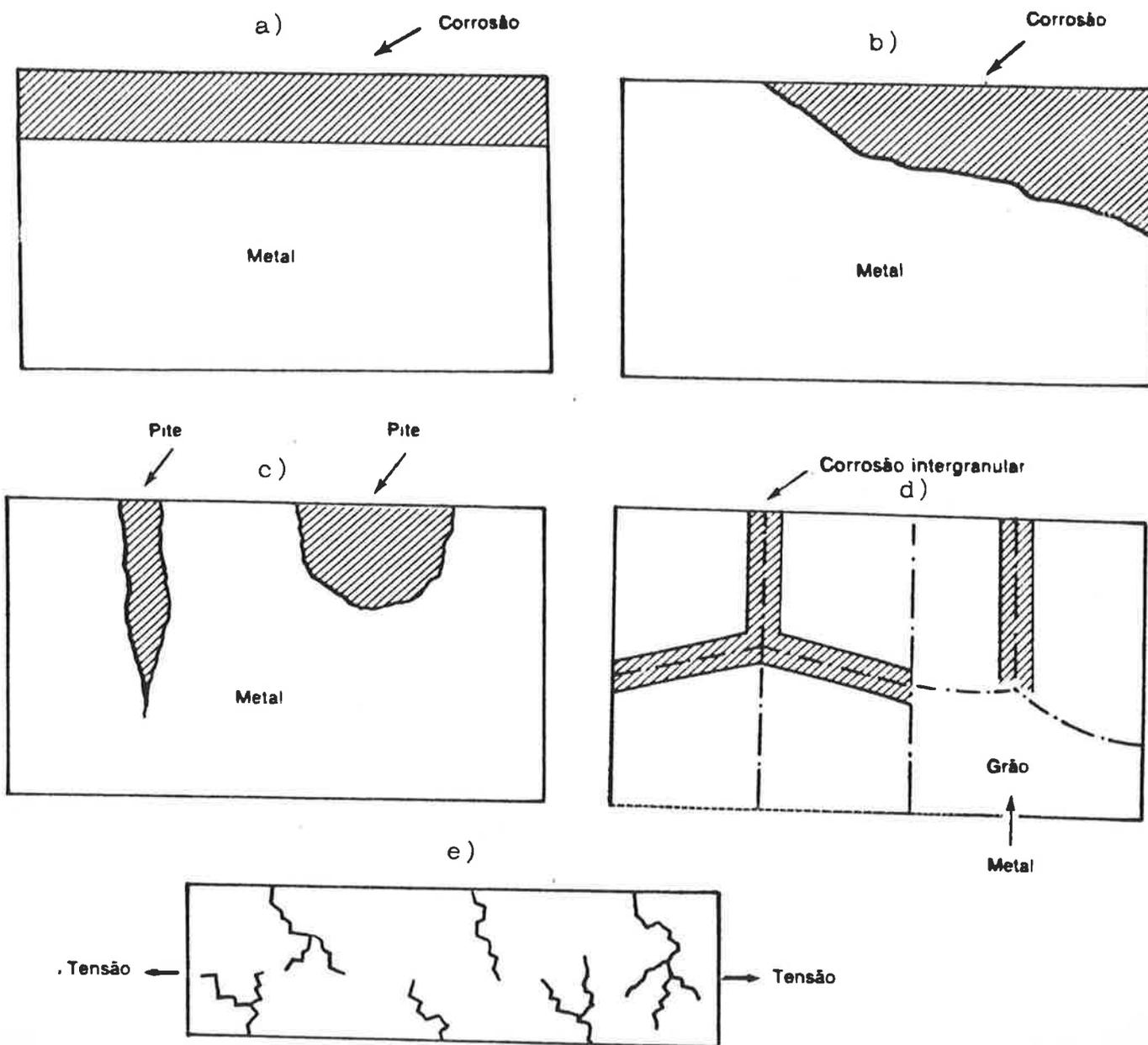


Figura 4.13 - Tipos de corrosão: a) uniforme; b) em placas; c) por pites; d) intergranular; e) sob tensão.

Para o caso de corrosão uniforme a velocidade do ataque pode ser expressa de diversas formas.

Uhlig (49) afirma ser comum nos Estados Unidos a utilização dos índices:

- ipy ("inches penetration per year");
- mdd ("milligrams per square decimeter per day").

Quanto ao ataque por pites, este mesmo autor cita a utilidade de se quantificar o processo através do "fator de pite" ("pitting factor"), obtido pelo quociente entre a profundidade do pite mais acentuado pela espessura de desgaste uniforme do metal que ocorreria sob a mesma perda de peso devida aos pites (Figura 4.14).

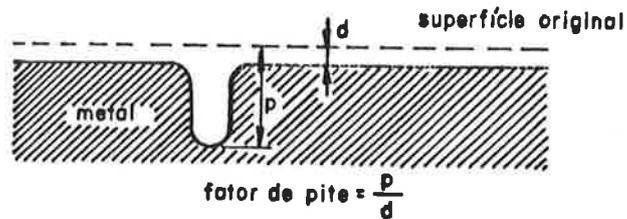


Figura 4.14 - Definição do "fator de pite" em função do "pit" mais profundo.

Fontana e Greene (60) chamam a atenção, ainda, para a natureza auto-catalítica dos pites (Figura 4.15).

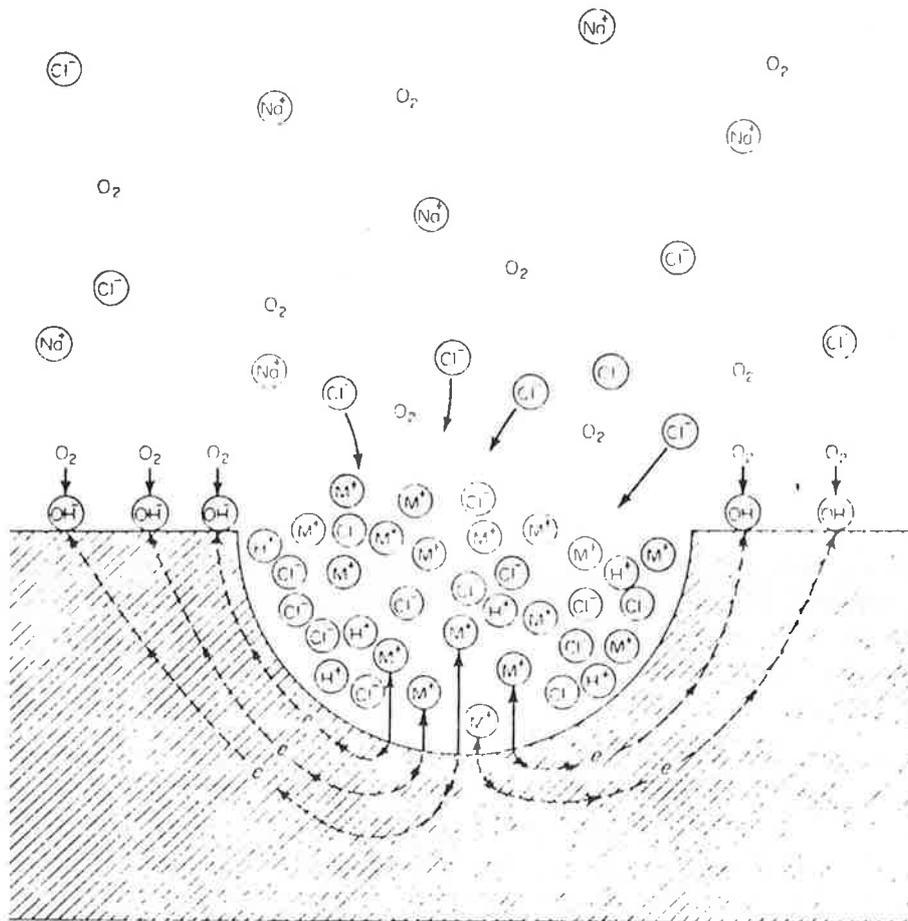


Figura 4.15 - Processo auto-catalítico na corrosão por pites.

4.1.5 Mecanismos de Proteção Contra a Corrosão

Van Vlack (56) descreve a existência de "três métodos principais de evitar a corrosão":

- isolamento dos eletrólitos e eletrodos através de camadas de proteção;
- ausência da formação de pares galvânicos;
- uso da proteção galvânica.

As camadas protetoras do primeiro grupo citado podem ser confeccionadas com diversos materiais tais como: orgânicos (por exemplo as tintas), metais mais nobres (por exemplo a cobreação) e cerâmicos (por exemplo esmaltes vítreos). Estas camadas vão propiciar uma proteção ~~catódica~~ ^{por sacrifício} ao aço.

Este tipo de proteção pode ainda ser conseguido através da já citada apassivação do aço, onde a camada formada superficialmente vai proteger o metal do prosseguimento da corrosão.

No segundo grupo citado podem ser enquadradas tanto as recomendações de se limitar o projeto a um único metal, quanto as de se adotar isolantes elétricos entre os metais de composição diferente; pode-se ainda citar a escolha de materiais que sejam potencialmente menos susceptíveis à ocorrência de diferenças de potencial entre suas diferentes regiões, podendo esta característica ter sido conseguida quer por tratamento térmico quer por composição mais adequada.

A proteção galvânica citada, diz respeito à já comentada proteção ~~anódica~~ ^{anódica}. A associação do aço a outro metal menos nobre (Figura 4.17.a) faz com que o primeiro adquira caráter catódico e, no estabelecimento da corrosão, o metal anódico se corroerá em lugar do aço, "sacrificando-se" em benefício da integridade deste. Este mesmo tipo de efeito, isto é, aumentar o caráter catódico do aço, pode ser conseguido através do uso de uma voltagem aplicada no metal (Figura 4.17.b).

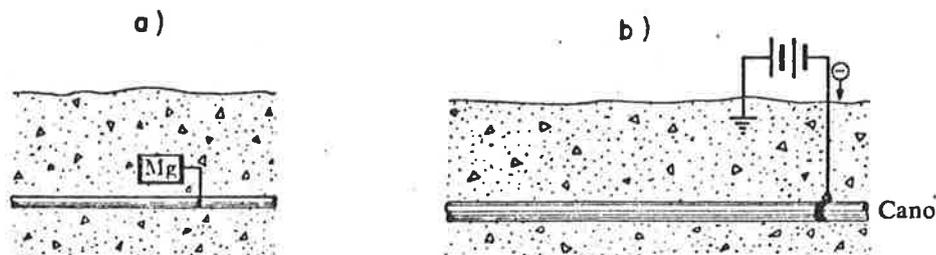


Figura 4.17 - Proteção galvânica: a) anódio de "sacrifício"; b) voltagem aplicada.

4.2 A CORROSÃO DA LAJE COMPOSTA

Conforme se comentou, a perda de espessura da chapa de aço por corrosão, no caso da laje composta, pode ser bastante crítica em função da pequena espessura desta.

No entanto alguns outros aspectos particulares a esta aplicação devem ser observados para se proceder a um estudo sistêmico da ocorrência da corrosão. Em função de seu caráter "bidimensional", os danos estruturais devidos a uma corrosão localizada são desprezíveis quando comparados a estruturas de concreto armado ou protendido que fazem uso de vergalhões, de caráter "unidimensional"; o seccionamento em um ponto determinado, neste último caso, pode ser catastrófico, enquanto na laje composta existe uma grande quantidade de chapa para redistribuição dos esforços.

Cabe ainda destacar que, no dimensionamento das lajes compostas, muitas vezes a situação crítica, isto é, a condição que define a quantidade de aço a ser utilizada, é representada pelos esforços existentes na fase de execução da laje. Na fase de utilização pode existir inclusive uma "folga" na solicitação do aço; isto gera uma certa "reserva" de material, determinando que, um pequeno "consumo" do mesmo, não chegue a comprometer a segurança.

Ao se analisar as possibilidades de corrosão da chapa de aço dobrada propriamente dita, há que se distinguir, de início, a existência de duas situações distintas: a face superior encontra-se em contato com o concreto, enquanto a inferior relaciona-se diretamente à atmosfera local. Analisa-se, a seguir, as diferenças existentes quanto à solicitação destas duas regiões.

4.2.1 A Face Superior da Chapa

A face superior da chapa vai estar em contato direto com o concreto; desta forma, apresentar-se-á de certa forma protegida contra a corrosão, à semelhança de um vergalhão de aço que compõe uma estrutura de concreto armado.

A existência de um "cobrimento" de concreto, desde que a execução deste tenha sido bem feita, protege a chapa de aço através do "impedimento" da formação de células eletroquímicas, através de proteção física e proteção química" (53).

4.2.1.1 Características do Concreto Relevantes Quanto à Proteção

Discute-se brevemente algumas das características do material concreto que influenciam a proteção contra a

corrosão da chapa de aço. Note-se que se tratará do assunto de maneira genérica, sem fazer distinção aos diferentes tipos de concreto passíveis de utilização, seja por serem constituídos por tipos distintos de cimentos, agregados, etc.

4.2.1.1.1 Hidratação

A hidratação e o endurecimento do concreto estão diretamente associados à hidratação da pasta de cimento.

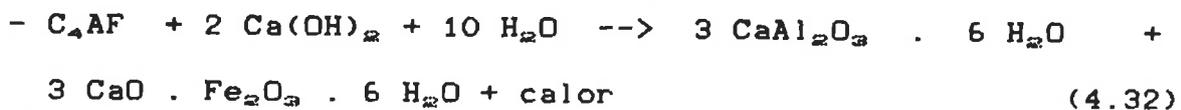
Na composição química do cimento anidro pode-se considerar a presença basicamente de quatro componentes:

- " C_3S " = 3 CaO . SiO_2 ;
- " C_2S " = 2 CaO . SiO_2 ;
- " C_3A " = 3 CaO . Al_2O_3 ;
- " C_4AF " = 4 CaO . Al_2O_3 . Fe_2O_3 .

A hidratação do cimento passa pelas seguintes etapas:

- os grãos são molhados e dispersos na água;
- aparecem produtos de hidratação na periferia dos grãos;
- a camada de hidratação desenvolve-se para o interior e, para o exterior, propaga-se na forma de pequenas agulhas (tobermorita) que vão-se entrelaçando, provocando a criação de uma estrutura rígida.

A hidratação dos componentes do cimento, anteriormente citados, dá-se simplificada através das reações:



Nestas é importante notar, além do caráter exotérmico do processo, a produção de hidróxido de cálcio a partir da hidratação dos constituintes principais do cimento (representam aproximadamente 70% do material): o C_3S e o C_2S .

4.2.1.1.2 Retração

O concreto está sujeito a uma série de deformações que podem ser de origem extrínseca, devido aos carregamentos externos, ou de natureza intrínseca. Analisa-se, a seguir, este último fenômeno.

O concreto pode sofrer retrações que costuma-se dividir em três tipos (61): química, por secagem e por carbonatação.

A retração química tem origem na própria reação de hidratação, que se dá com redução de volume, levando à característica de o concreto endurecido, isto é, que já reagiu, possuir maior quantidade de vazios que o concreto fresco.

A retração por secagem se dá em função de a água utilizada na mistura do concreto ser maior que a estequiometricamente necessária à reação da hidratação. Estabelece-se, pois, um equilíbrio com a umidade do meio ambiente, de forma que uma parte da água excedente deixa o concreto, gerando a formação de poros capilares no mesmo.

A retração por carbonatação tem sua origem na reação do hidróxido de cálcio, formado nas reações de hidratação, com o gás carbônico da atmosfera, regenerando o carbonato de cálcio.

Estes fenômenos possuem consequências relevantes no que tange à proteção contra a corrosão do aço propiciada pelo concreto: gera-se um aumento da porosidade do mesmo, com o conseqüente aumento da facilidade de acesso do meio agressivo ao aço, bem como reduz-se a alcalinidade do concreto, em função do consumo do hidróxido de cálcio. A importância destes fatos será melhor discutida adiante.

4.2.1.1.3 Resistência à compressão

Pode ser considerada como a principal característica do concreto, seja por sua importância intrínseca, já que muitas vezes este material é utilizado com a principal função de resistir a esforços de compressão, ou seja porque a variação da resistência está diretamente associada à variação de outras propriedades do concreto.

A resistência à compressão do concreto depende da sua idade, da relação água-cimento utilizada, do procedimento de cura adotado e dos agregados empregados.

Abrams estabeleceu que, definidos os materiais a serem empregados bem como o procedimento de cura, a resistência à compressão dos concretos, a uma certa idade "j", em função do fator água-cimento "x", seria dada por:

$$f_{c_j} = \frac{A}{B^{2x}} \quad (4.33)$$

onde "A" e "B" são constantes.

4.2.1.1.4 Permeabilidade

Quanto maior a compactidade do concreto menor é a sua permeabilidade. Assim é que concretos com maior fator água-cimento levam, em geral, a um aumento da quantidade de vazios, o que reduz a compactidade, aumentando a permeabilidade do material, conforme se ilustra na Figura (4.18) (62).

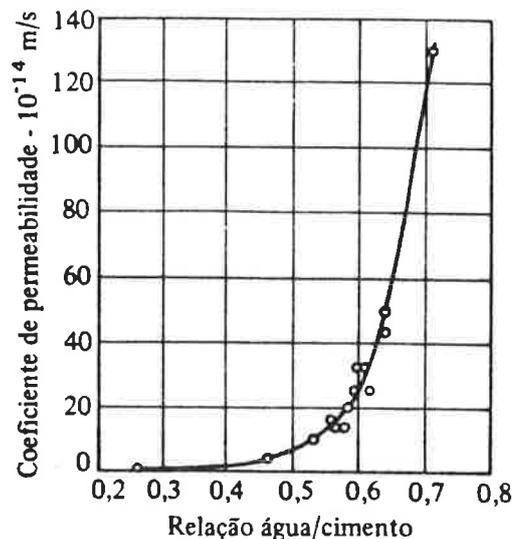


Figura 4.18 - Relação entre permeabilidade e relação água-cimento de pastas endurecidas (93% do cimento hidratado).

4.2.1.1.5 Velocidade e Extensão da Carbonatação

A carbonatação diz respeito à reação do hidróxido de cálcio presente no concreto com o gás carbônico do ar, conforme a expressão:



Na medida em, para ocorrer, há a necessidade de contato com o CO_2 , a extensão da carbonatação está intimamente associada à porosidade do concreto. Pode-se ver nas Figuras 4.19 e 4.20 a influência do fator água-cimento quanto a este fenômeno (53).

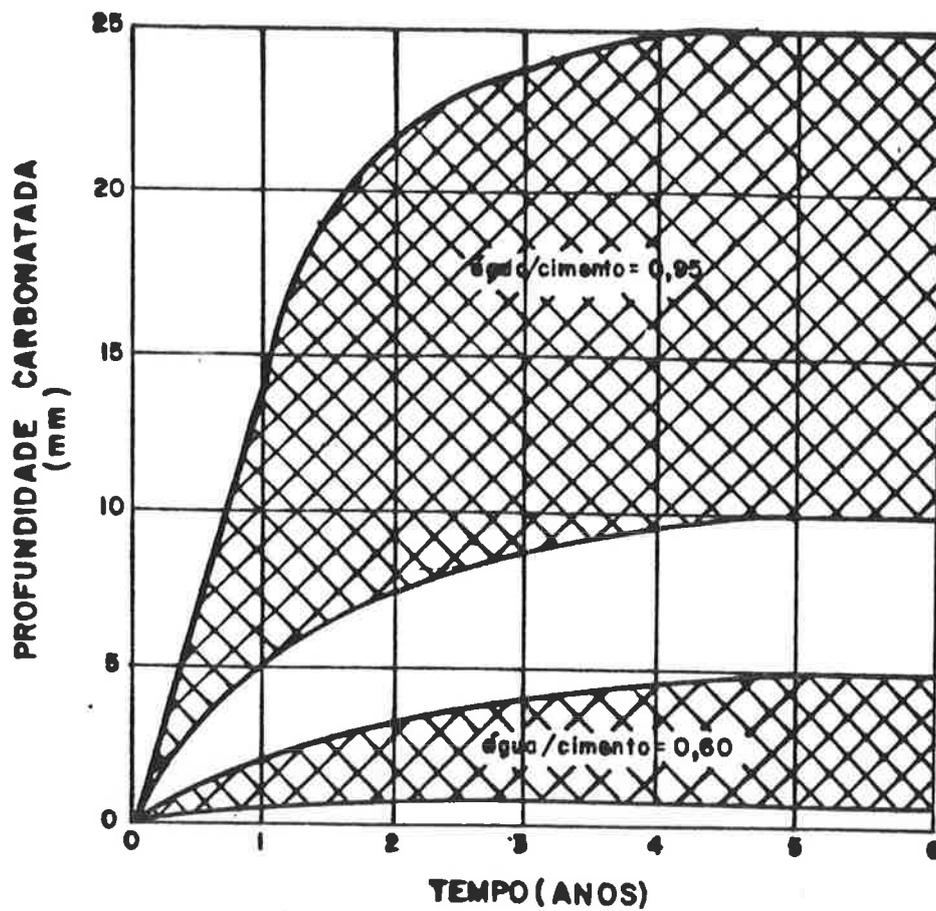


Figura 4.19 - Variação da profundidade de carbonatação com o tempo.

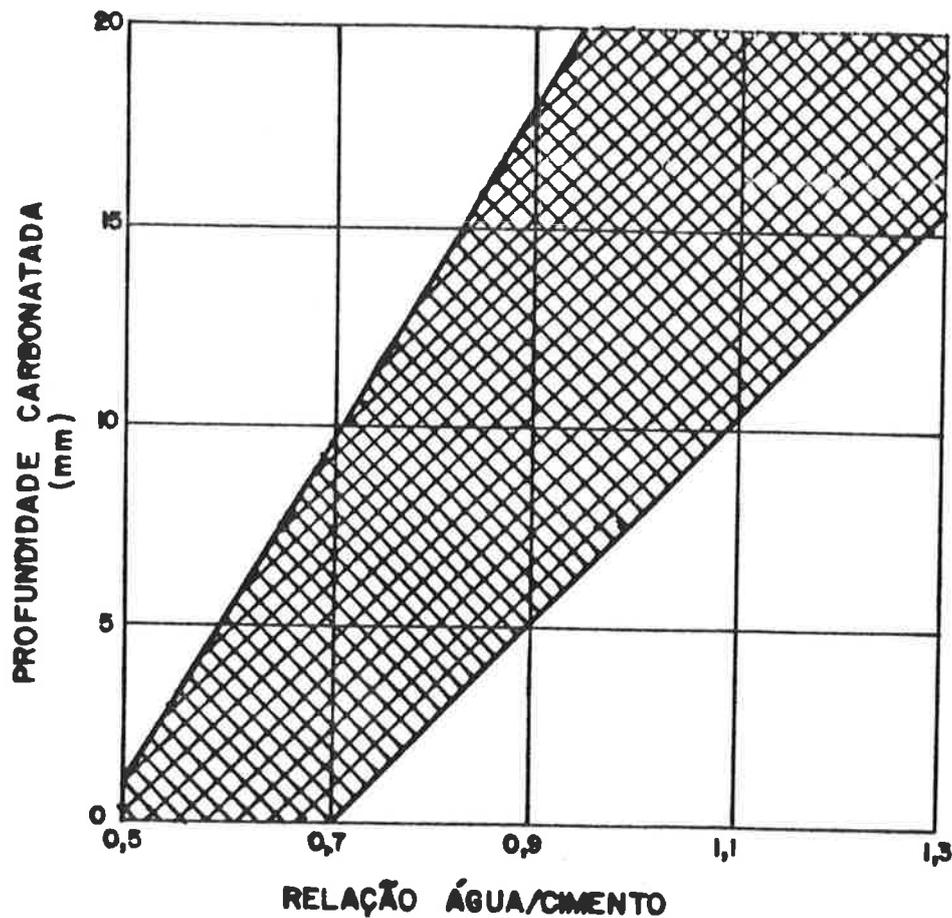


Figura 4.20 - Influência da relação água-cimento na profundidade de carbonatação.

4.2.1.2 A Proteção ao Aço

Conforme anteriormente citado, esta proteção baseia-se na ocorrência de dois tipos de mecanismo: um físico e outro químico.

O mecanismo físico associa-se à criação de uma "barreira" que isole o componente metálico do meio ambiente. Discutiu-se anteriormente que a razão de corrosão é determinada, entre outros fatores, pela presença de água, de um eletrólito adequado e de agentes agressivos. À medida em que um concreto compacto dificulta o acesso destes ao metal-base, tem-se uma conseqüente atenuação do processo.

Denota-se imediatamente (vide Figura 4.18) que esta proteção física é tanto mais efetiva quanto menor o fator água-cimento utilizado, desde que garantida uma aplicação adequada do material.

Quanto à proteção química proporcionada, esta tem origem na liberação de hidróxido de cálcio durante a hidratação do concreto, conforme já citado. Esta base forte dissolve-se na água existente nos poros do concreto, dando origem a um meio bastante alcalino, com pH da ordem de 12,6.

O mecanismo pelo qual esta proteção se processa pode ser visualizado qualitativamente através do Diagrama de Pourbaix para o ferro, apresentado na Figura 4.21.

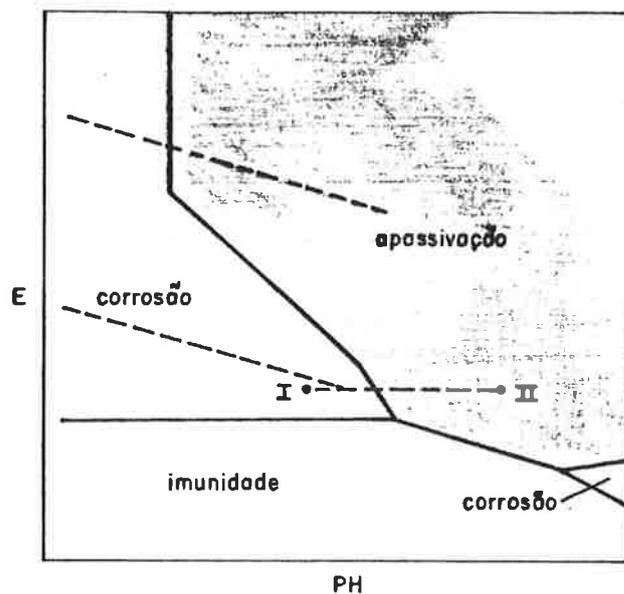


Figura 4.21 - Diagrama de Pourbaix para o sistema Fe - H₂O: domínios do comportamento quanto à corrosão.

Qualitativamente falando, seja um perfil de aço que se encontre em uma condição inicial de pH e de existência de diferença de potencial representada pelo ponto "I"; ao ser recoberto pelo concreto, o aumento do pH pode levá-lo à condição indicada pelo ponto "II".

Portanto, a alcalinidade ^{proporcionada} pelo concreto pode gerar condições para a apassivação do aço, protegendo-o portanto da ocorrência de corrosão.

Novamente denota-se a importância (vide Figuras 4.19 e 4.20) da relação água-cimento utilizada. A ocorrência de carbonatação significa o consumo do hidróxido de cálcio presente em solução e, portanto, leva a um abaixamento da alcalinidade da mesma, podendo gerar a perda de proteção do aço.

Portanto, ao se recomendar um recobrimento mínimo de concreto que seja efetivo na proteção do aço contra a corrosão é importante se considerar, além das condições de agressividade do meio, o tipo de concreto que será utilizado, considerando-se o tipo de cimento, de agregados e, em particular, o fator água-cimento a ser utilizado.

A NBR - 6118/78 (25) dá recomendações quanto a recobrimentos mínimos, algumas das quais transcritas a seguir:

- . para concreto revestido com argamassa de espessura mínima de 1 cm:
 - em lajes no interior de edifícios 0,5 cm
 - em lajes ao ar livre 1,5 cm
- . para concreto aparente:
 - no interior de edifícios 2,0 cm
 - ao ar livre 2,5 cm
- . para concreto em meio fortemente agressivo 4,0 cm

Apesar de, como regra geral, ter-se para as lajes de concreto armado as armaduras situadas na parte inferior e, portanto, o recobrimento referir-se à camada de concreto existente na face inferior do componente, o concreto sobre a chapa, no caso da laje composta, encontra-se em boa parcela sujeito a esforços de compressão; logo, menos sujeito a fissuras que propiciem o contato com o meio agressivo. Mais que isto, as espessuras de concreto normalmente adotadas, acima da chapa, são bastante superiores ao maior valor indicado nesta norma.

Cabe discutir aqui o caso particular de utilização de chapas de aço galvanizado. Wolyneć (63) afirma que em meios com pH superior a 11, o zinco apresenta normalmente pequena resistência à corrosão, o que poderia ser problemático no caso do contato com o concreto, onde se estabelece uma alcalinidade superior à citada. No entanto, este mesmo autor indica que "de longa experiência se sabe que os produtos galvanizados podem ser empregados embebidos em argamassa como em concreto, sem que nenhuma corrosão mais acentuada venha a se manifestar, a não ser em algumas condições particulares". Credita ainda este comportamento ao

estabelecimento de uma apassivação protetora que, apesar de pouco elucidada, "seria determinada por componentes presentes no cimento em teores residuais, os quais agiriam como inibidores de corrosão do zinco".

Wolynec chama ainda a atenção para o aumento do número de casos de corrosão em tubos galvanizados em contato com argamassas mais recentemente, e credita este fato ao aumento indiscriminado de utilização de aditivos aceleradores nestas argamassas. "A corrosão que se manifesta nos tubos galvanizados é do tipo localizado" (63), o que não seria tão problemático, do ponto de vista estrutural, para a laje composta.

Estudos realizados no IPT (63) indicam que "os aditivos contendo cloretos podem tornar a argamassa corrosiva desde que o teor em massa de cloretos na argamassa preparada seja superior a 0,06 - 0,08%".

Apesar de o fenômeno não estar perfeitamente esclarecido, cabe a recomendação de se dedicar uma atenção especial quando da utilização de concretos aditivados.

4.2.2 A Face Inferior da Chapa

A face inferior da chapa de aço dobrada estará sujeita ao ataque da atmosfera local. Conforme se discutiu anteriormente, para haver corrosão do aço nestas condições faz-se necessária a presença de umidade, para permitir um processo eletroquímico; o ataque gasoso direto pode ocorrer, segundo Adam (51), "somente em altas temperaturas, para vencer as altas energias de formação dos produtos de corrosão associados".

O tipo de ataque a que está sujeita a chapa denomina-se corrosão atmosférica, definida por Tanaka (50) como "um processo resultante de reações químicas ou eletroquímicas, por meio do qual um metal ou ligas metálicas se deterioram, quando submetidos à ação climática". A umidade, segundo Boyd (64), "pode vir da chuva, garoa, neblina, ou pode se desenvolver como resultado de condensação".

Rozenfeld (65) indica que mesmo superfícies limpas de alguns metais "são capazes de absorver uma película de umidade de espessura correspondente a várias dezenas de moléculas para umidades relativas abaixo de 100%". Este mesmo autor refere-se à formação dessa película como um processo de absorção-condensação em que o filme de umidade "adere à superfície do metal devido a forças de adsorção que precedem o processo puramente físico de condensação".

A presença de umidade por condensação pode ocorrer quando a umidade relativa do ar na região em contato com a chapa alcança os 100%; essa umidade "tende a captar certos contaminantes do ar e se torna um eletrólito" (64). No entanto, conforme Rozenfeld (65) e Boyd (64), a concentração de umidade sobre a superfície pode se dar para umidades relativas inferiores. Boyd (64) afirma que "a umidade também pode se formar sobre a superfície como resultado da adsorção e/ou a presença de substâncias higroscópicas".

Assim, a presença de partículas depositadas, a rugosidade do material, bem como a existência de fissuras podem facilitar a concentração de umidade sobre a chapa, seja pela higroscopicidade dos produtos, pelo desenvolvimento de tensões capilares ou mesmo pelo abaixamento da pressão de saturação de vapor das soluções originadas. Rozenfeld (65) indica ainda que "os produtos de corrosão formados sobre a superfície do metal alteram suas propriedades de adsorção".

Em função das condições reinantes em cada atmosfera, detecta-se a existência de um valor mínimo de umidade relativa do ar a partir do qual a corrosão atmosférica processa-se a velocidades consideráveis. Boyd (64) define umidade relativa crítica como sendo aquela "necessária para provocar o desenvolvimento suficiente de umidade sobre a superfície para permitir que a corrosão se inicie".

No gráfico fornecido por Tanaka (50), conforme a Figura 4.22, fica patente a importância da umidade relativa no desenvolvimento do processo, bem como a umidade relativa crítica para a situação ilustrada é estimada pelo autor como estando em torno de 60%.

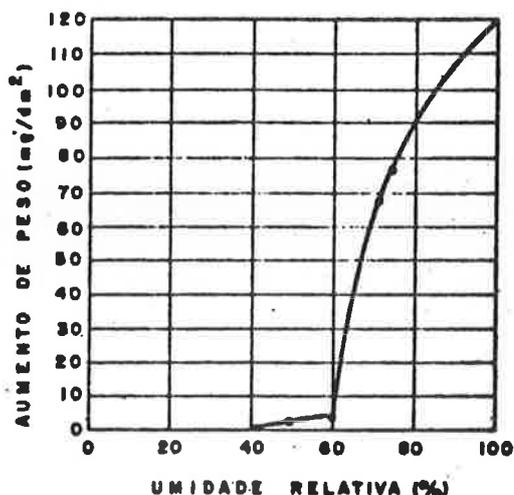


Figura 4.22 - Corrosão do ferro no ar com 0,01% SO_2 : exposição de 55 dias em função da umidade relativa.

Tanaka (50) indica que a "atmosfera rural caracteriza-se pelo seu elevado grau de umidade e pela pequena agressividade, devido à ausência de contaminantes", com o que concorda Boyd (64) ao afirmar que "sob estas condições, a velocidade de ataque sobre um metal como o ferro é relativamente baixa, a menos que contaminantes carreados pelo vento, tais como pós de fertilizantes, estejam presentes".

Boyd (64) indica que, em atmosferas industriais, "a presença de SO_2 resulta em um significativo abaixamento da umidade relativa crítica" e que os materiais particulados podem promover a existência de células de corrosão "atuando como catódios locais, isolando a superfície do oxigênio, e coletando umidade do ar".

Tanaka (50) afirma que a "atmosfera marítima caracteriza-se por apresentar quantidades apreciáveis de Cl^- ", e Adam (51) indica abaixamentos de umidade relativa crítica mais acentuados para o caso de presença de cloretos em relação a sulfatos, complementando porém com a afirmação de que, "apesar de a corrosão onde há cloro começar com umidade relativa mais baixa, a velocidade de corrosão pode ser maior em atmosferas com sulfato, devido à estrutura dos produtos de corrosão formados".

Boyd (64) chama a atenção para a influência das chuvas, indicando que o seu efeito de lixiviação pode ser benéfico em alguns casos - quando carrega os contaminantes superficiais por exemplo - e danosos em outros - ao retirar produtos de corrosão protetores. Complementa ainda indicando que a condensação de umidade, por outro lado, "não resulta na ação enxaguante de fortes chuvas" citando casos em que "a protegida mas contaminada face inferior de um painel de teste frequentemente corrói a velocidades superiores que a face superior", o que pode de alguma forma ser transferido para o caso da laje composta.

Apenas para completar, observe-se a possibilidade de, nos apoios da laje, ter-se a face inferior da chapa em contato com concreto ou mesmo com aço, havendo a possibilidade de ocorrência de pares galvânicos no caso de diferentes características entre os materiais em contato.

Trata-se, a seguir, basicamente da proteção da chapa de aço contra a corrosão no que tange à sua face inferior.

4.3 PRINCÍPIOS DA CONSECUÇÃO DE SEGURANÇA

Viu-se que o fenômeno de corrosão da chapa de aço dobrada, que constitui a laje composta, deve ser considerado e adequadamente tratado. No entanto, este controle deve ser enxergado não como uma etapa estanque do empreendimento, como muitas vezes acontece, e sim como uma atividade que interage com várias outras etapas do mesmo. É neste sentido que passa-se a discutir o problema de uma maneira ampla, que se inicia pela própria concepção do componente, passa pela descrição de opções quanto à adoção de materiais especiais e termina por discutir os revestimentos protetores propriamente ditos.

4.3.1 O Projeto como Agente de Controle da Corrosão

Segundo Pludek (66), os efeitos de um mal projeto podem induzir a um incremento do fenômeno corrosivo, e raras vezes esses defeitos podem ser corrigidos pelos revestimentos. Analisa-se aqui aspectos relativos à concepção da geometria da chapa a ser utilizada. Esta discussão, útil ao projetista quando da escolha entre os componentes disponíveis no mercado, pode auxiliar, neste momento, na própria definição de componentes a serem futuramente produzidos pelas indústrias.

Um projeto adequado deve levar em conta (67), entre outros, os seguintes aspectos:

- diminuição da possibilidade de criação de condições propícias ao desenvolvimento da corrosão eletroquímica;
- aumento da facilidade de aplicação e das condições para que os eventuais revestimentos adotados tenham maior vida útil;
- facilidade de inspeção e manutenção.

Um projeto estrutural adequado deve nascer de uma solução de compromisso com a segurança contra a corrosão, sendo que algumas destas soluções não apresentam dificuldades significativas, tais como simples notas de projeto, enquanto outras são mais problemáticas, podendo levar a um aumento do custo estrutural. O que importa, no entanto, é que o resultado global seja otimizado.

A análise a seguir será segmentada em três tipos de abordagem:

- da importância da forma, bem como das condições superficiais, de um componente isolado;

- dos procedimentos mais adequados para a união entre componentes;
- de aspectos genéricos quanto à concepção da laje como um todo.

4.3.1.1 A Geometria do Componente

Na escolha ou concepção dos componentes deve-se optar por formas cuja fabricação, união e tratamentos não favoreçam a corrosão. Em particular devem ser evitados detalhes que levem à concentração de agentes agressivos (água, poeira, etc), bem como a concepção dos componentes deve favorecer a aplicação e a eficiência de eventuais revestimentos protetivos, levando a uma continuidade e uniformidade dos mesmos (68).

Note-se que a facilidade quanto a se pintar um componente deve ser considerada diferentemente em função de esta atividade ser realizada em campo ou em fábrica; no entanto, mesmo para o caso de um componente pré-pintado, deve-se considerar a necessidade de manutenção, já que os revestimentos possuem uma vida útil finita.

Dentro de todo este contexto, apresenta-se, a seguir, algumas recomendações quanto à geometria dos componentes.

O "NACE" (68) indica que "superfícies planas (ou lisas) são preferíveis". Elas otimizam o escoamento dos agentes agressivos bem como a aplicação de revestimentos.

Na Figura 4.23 nota-se que uma geometria muito "acidentada" pode propiciar a formação de depósitos de eletrólito.

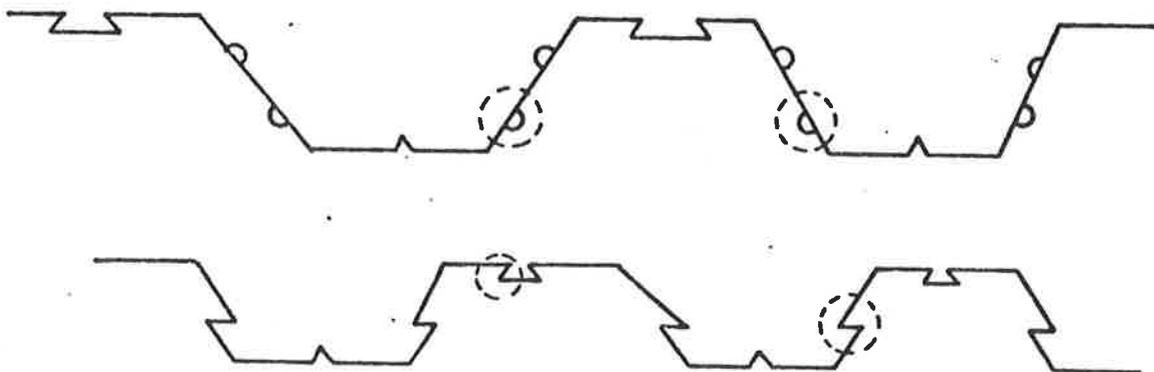


Figura 4.23 - A não planicidade das chapas e a possibilidade de corrosão (destaque para os pontos críticos).

Pludek (66) afirma que as geometrias curvas são favoráveis comparadas às que apresentam cantos. Dificultam a concentração de agentes agressivos bem como propiciam maior uniformidade do revestimento. Dentro deste espírito, uma chapa ondulada apresentaria vantagens sobre um perfil trapezoidal (Figura 4.24).

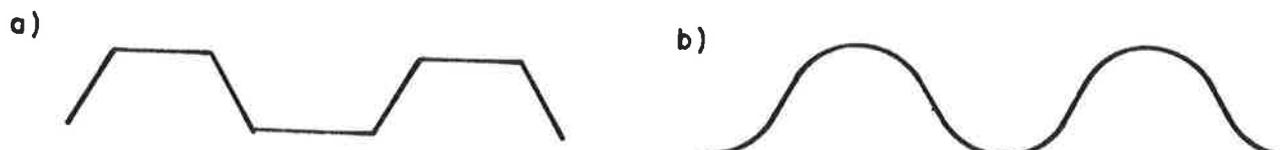


Figura 4.24 - A preferência por superfícies curvas:
a) perfil trapezoidal; b) perfil ondulado.

Weismantel (69) indica que os cantos arredondados são favoráveis; diz ainda que, no caso de corte a fogo dos componentes, as extremidade da região cortada devem ser arredondadas por esmerilhamento.

No caso da laje composta, a chapa possui uma espessura bastante reduzida, o que pode tornar irrelevante a preocupação com suas extremidades; no entanto, a curvatura da região dobrada deve ser tratada cuidadosamente no que se refere à segurança contra a corrosão.

Fraser (70) ilustra, conforme a Figura 4.25-a, que quando da cura de um revestimento orgânico aplicado, pode-se gerar desuniformidade da espessura do mesmo em função da existência de cantos vivos. Weismantel (69) ilustra ainda, conforme a Figura 4.25-b, a diferença de comportamento associado respectivamente a um canto côncavo e outro convexo. No primeiro caso surge um vazio causado pelo repuxamento da película de tinta durante sua cura ou secagem, enquanto no segundo, nota-se mais uma vez a tendência de o revestimento "fugir" das arestas e cantos vivos.

Pludek (66) comenta que os ângulos obtusos e outros detalhes que dificultem o acesso a regiões localizadas devem ser evitados, conforme se indica na Figura 4.26. Neste aspecto, os perfis do tipo "rabo-de-andorinha" são desfavoráveis.

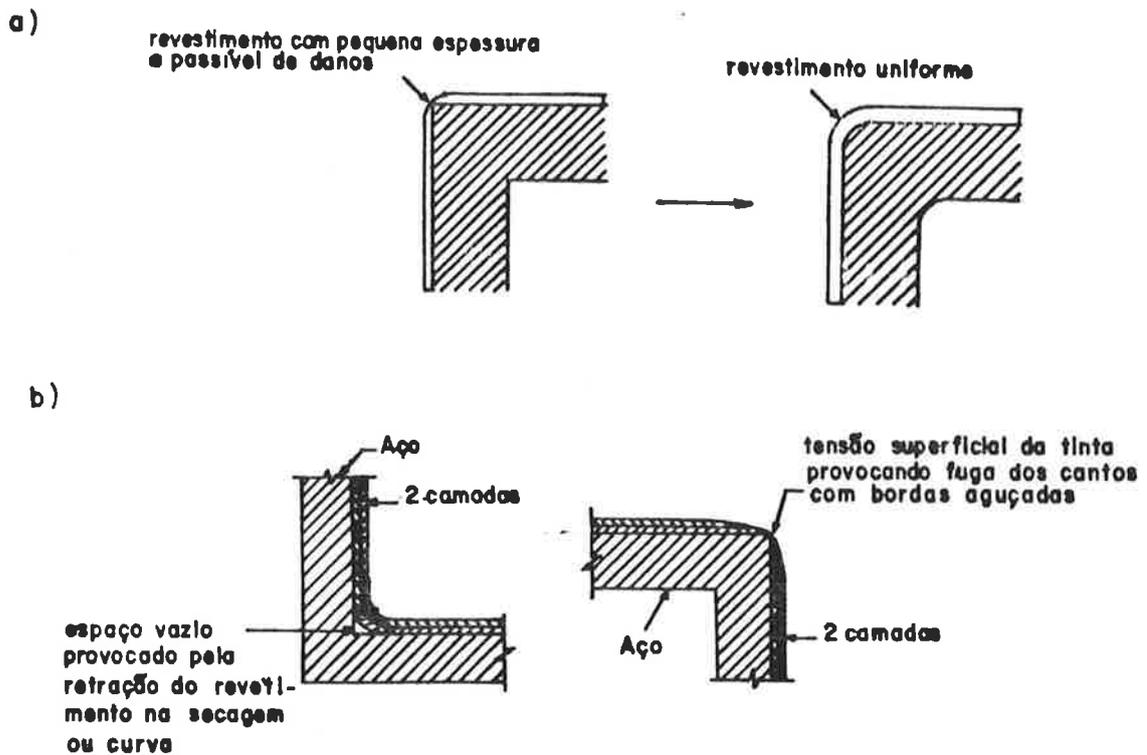


Figura 4.25 - O efeito da geometria dos cantos quanto ao desempenho do revestimento orgânico: a) as vantagens do arredondamento (70); b) cantos côncavos e convexos (69).

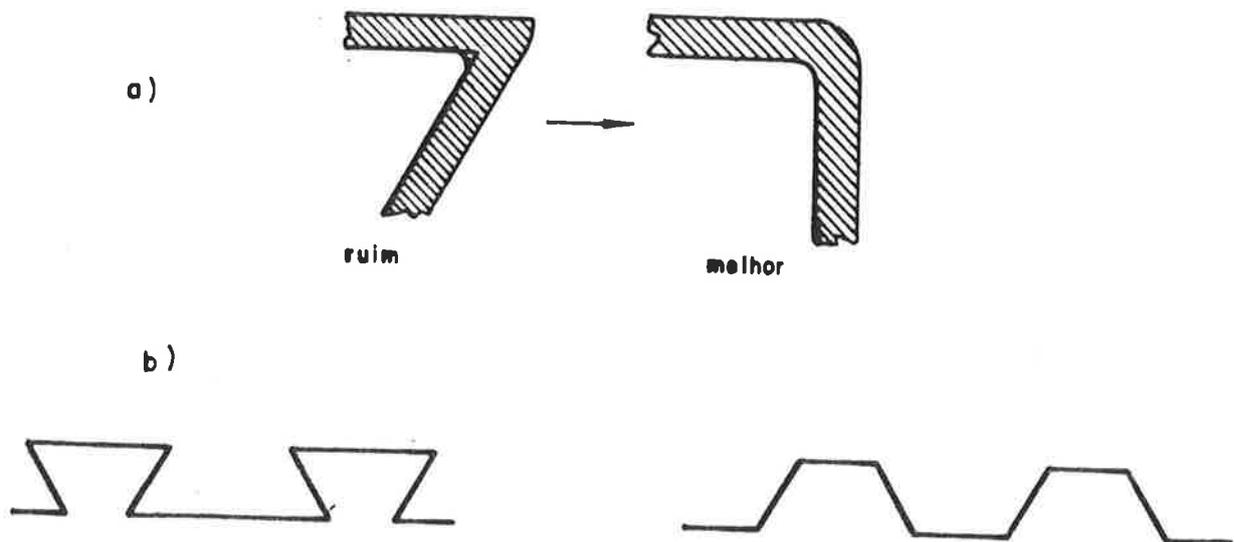


Figura 4.26 - A facilidade de acesso é importante: a) ângulos obtusos geram regiões de difícil acesso (66); b) perfis "rabo-de-andorinha" são desfavoráveis em comparação com trapezoidais.

Pludek (66) afirma que "o projetista não deve usar cantoneiras solidarizadas especularmente por parafusos ou soldas intermitentes" (Figura 4.27-a); das recomendações de Weismantel infere-se também que os componentes simples são preferíveis aos compostos. Assim, a adoção de lajes compostas "celulares" (Figura 4.27-b) deve ser cuidadosamente analisada.

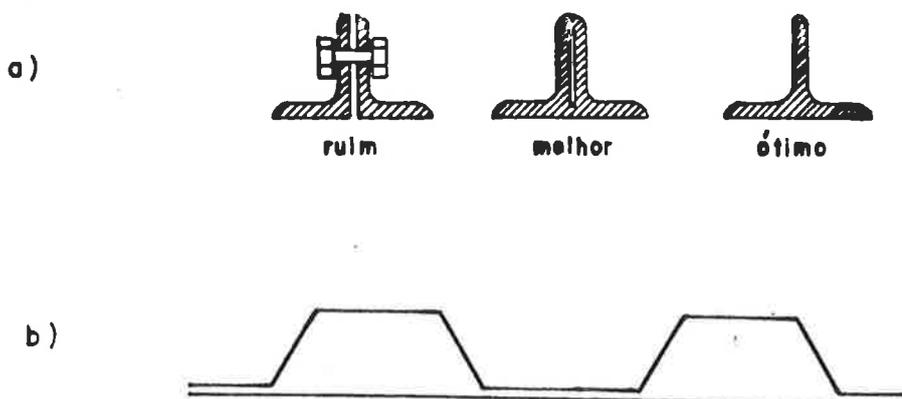


Figura 4.27 - As geometrias simples são preferíveis às compostas: a) solidarização de cantoneiras (66); b) laje composta com perfil celular.

A utilização de perfis do tipo celular deve ainda ser analisada sob outros aspectos. A BS 5493 (71) indica que no caso de seções do tipo caixão comprovadamente seladas em relação ao meio, sua superfície interna não necessita de proteção.

A DIN 55928 (72) afirma que os componentes que possuam caixões abertos "devem possuir ventilação e buracos de drenagem adequados em quantidade e dimensão com relação à solicitação corrosiva". A BS 5493 (71) complementa ainda que, no caso de a hermeticidade de tais componentes ser impraticável, "a pintura das faces internas pode ser necessária"; indica como interessante a adoção de tintas de acabamento interno claras, o que facilita a detecção de uma eventual ocorrência de corrosão.

4.3.1.2 A União dos Componentes

O processo de solidarização, das chapas entre si e destas com o restante da estrutura, tem influência no controle da corrosão. Passa-se, a seguir, à discussão de alguns problemas que podem surgir.

No apêndice A da BS 5493 (71) recomenda-se que "as cavidades ou juntas devem ser evitadas ou, se inevitáveis, preenchidas com solda ou mastique". A execução de lajes compostas propicia a formação desse tipo de justaposição de componentes, seja no encontro chapa-chapa ou no apoio sobre uma viga de aço (Figura 4.28).

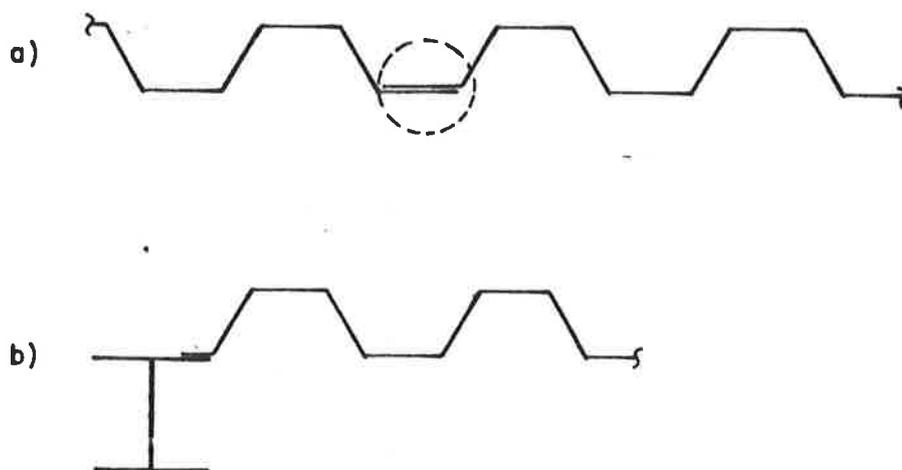


Figura 4.28 - O aparecimento de frestas na execução da laje composta: a) ligação chapa-chapa; b) ligação chapa-viga de aço.

Apesar de considerar-se que "as soldas descontínuas e solda a ponto criam o risco de corrosão em frestas" (72), as duas uniões indicadas na Figura 4.28 são normalmente feitas por solda a ponto. A BS 5493 (71) recomenda o selamento de eventuais frestas com solda, mas afirma que "outro método seria o de preencher as cavidades com concreto que fosse vibrado para a posição", o que de certa forma ocorre nas lajes compostas. Diz ainda que "pequenos espaços podem ser preenchidos com mastique ou pasta inibidora de corrosão ou gaxetas de aço recobertas com pintura inibidora" (71).

Quanto à ligação chapa-chapa, a opção por solidarizá-las através de "mordeduras" (vide Figura 3.30) não se apresenta como uma solução potencialmente mais favorável já que, conforme a DIN 55928 (72), "devido à sua superfície mais lisa, as estruturas soldadas são preferíveis às revestidas ou aparafusadas". O efeito de mordeduras levaria a consequências semelhantes.

Discutiu-se, no capítulo 3, uma possibilidade de conexão às vigas na qual algumas destas frestas são evitadas; trata-se da montagem simultânea da viga de concreto armado com a laje composta (28), mostrada na Figura 4.29.

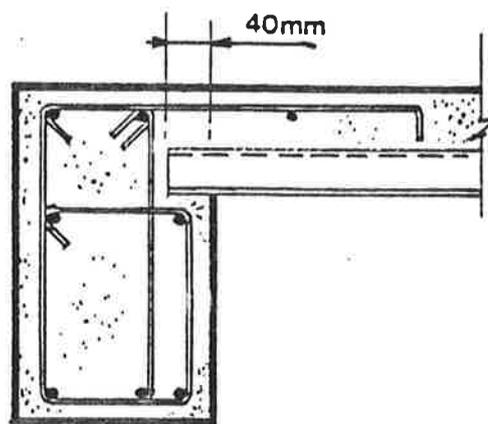


Figura 4.29 - Concretagem simultânea laje composta-viga de concreto armado. (28)

A norma DIN 55928 (72) chama a atenção para o fato de que quando "componentes são feitos de metais possuidores de diferentes potenciais elétricos há o risco de corrosão galvânica se umidade (atuando como um eletrólito) está presente por um longo período ou alternadamente presente e ausente". Esta possibilidade se apresenta em situações do tipo da ilustrada na Figura 4.28-b, quando o aço utilizado nos perfis das vigas é normalmente distinto daquele que constitui a chapa dobrada (normalmente catódico em relação ao das vigas).

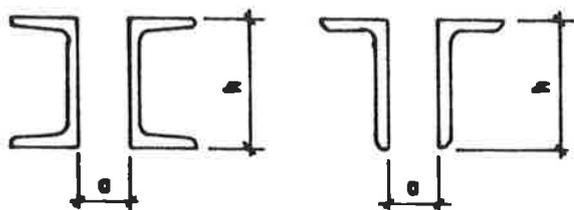
A própria DIN 55928 (72) diz que este tipo de "corrosão galvânica pode ser prevenida por meio de camadas intermediárias isolantes (por exemplo componentes plásticos, pastas isolantes, revestimentos)".

Pludek (66) acrescenta que "os membros estruturais menos nobres de estruturas bi-metálicas devem ser maiores ou mais espessos para absorver o desgaste pela corrosão quando funciona como proteção sacrificial das unidades estruturais anódicas". Considerada a viga como anódio do processo, esta situação recomendada se verifica normalmente. Há que se acrescentar, no entanto, que os eventuais tratamentos superficiais das chapas, bem como o concreto vibrado nas proximidades do contato, podem propiciar um certo isolamento dos componentes.

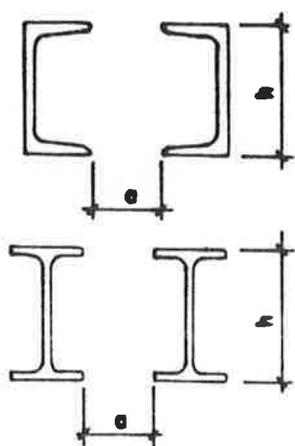
A BS 5493 (71), referindo-se a componentes metálicos associados a concreto, indica que "o concreto de cimento Portland tende a inibir a corrosão do aço envolto pelo mesmo, mas não protege o aço que está próximo à interface com o meio corrosivo". A interface entre a região imersa no concreto e a saliente do mesmo é crítica quanto à formação de um mecanismo eletroquímico; pode-se gerar uma célula de aeração diferencial, funcionando a região interna ao concreto e próxima à interface como anódio.

Esta situação pode ocorrer no caso da interface chapa-viga de concreto armado (Figura 4.29); no caso de uma eventual corrosão, no entanto, desde que a aderência entre a chapa e o concreto esteja garantida ao longo de toda a laje, uma eventual perda do material imerso no concreto não deve trazer sérias consequências estruturais já que, próximo aos apoios, tem-se normalmente tração na região superior da laje.

A DIN 55928 (72) discute espaçamentos mínimos que devem ser deixados entre componentes constituintes de uma dada montagem, de forma a que se permita o acesso para a execução e a manutenção do revestimento. Estas recomendações, para componentes especulares acessíveis pelos dois lados, encontram-se reunidas na Figura 4.30.



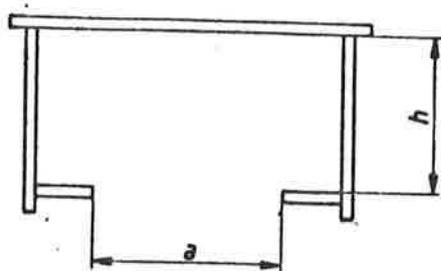
- . $h < 100 \text{ mm} \Rightarrow "a" \geq 150 \text{ mm}$
- . $100 \text{ mm} < h \leq 1000 \text{ mm}$
- > "a" cresce linearmente:
 - $h = 100 \text{ mm} \Rightarrow "a" = 150 \text{ mm}$
 - $h = 1000 \text{ mm} \Rightarrow "a" = 400 \text{ mm}$
- . $h > 1000 \text{ mm} \Rightarrow "a" \geq 500 \text{ mm}$



- . $h \leq 100 \text{ mm} \Rightarrow "a" \geq 120 \text{ mm}$
- . $100 \text{ mm} < h \leq 1000 \text{ mm}$
- > "a" cresce linearmente:
 - $"h" = 100 \text{ mm} \Rightarrow "a" = 120 \text{ mm}$
 - $"h" = 1000 \text{ mm} \Rightarrow "a" = 400 \text{ mm}$
- . $h > 1000 \text{ mm} \Rightarrow "a" \geq 500 \text{ mm}$

Figura 4.30 - Recomendações quanto ao espaçamento de perfis solidarizados espelhamente: a) faces lisas internamente; b) protuberâncias na região interna.

Para componentes compostos por soldagem, acessíveis por um só lado, esta mesma norma indica espaçamentos mínimos conforme a Figura 4.31.



- $h \leq 100 \text{ mm} \Rightarrow "a" \geq 15 \text{ mm}$
- $100 \text{ mm} < h < 500 \text{ mm}$
 -> a cresce linearmente:
 $h = 100 \text{ mm} \Rightarrow a = 120 \text{ mm}$
 $h = 500 \text{ mm} \Rightarrow a = 400 \text{ mm}$
- $h > 500 \text{ mm} \Rightarrow a \geq 500 \text{ mm}$

Figura 4.31 - Acessibilidade a seções compostas por soldagem.

Estas recomendações podem ser consideradas como subsídio para a análise dos espaçamentos entre "ondas" das chapas dobradas (Figura 4.32).



Figura 4.32 - Acessibilidade à região interna das chapas dobradas: a) perfil trapezoidal; b) perfil "rabo-de-andorinha".

As chapas de perfil trapezoidal e, as de perfil "rabo-de-andorinha" poderiam ser associadas às situações descritas, respectivamente, nas Figuras 4.30-a e 4.30-b. A acessibilidade por um único lado, no entanto, pode sugerir a adoção da situação descrita na Figura 4.31.

Seja qual for a comparação adotada, as chapas usuais anteriormente descritas apresentam-se em geral compatíveis com estas recomendações.

4.3.1.3 Detalhes Gerais da Concepção

Passa-se, agora, a uma complementação do que foi dito nos itens anteriores, discutindo-se algumas alternativas a serem analisadas na concepção da laje composta.

A BS 5493 (71) indica que "o projetista deve esforçar-se para assegurar que os revestimentos protetores possam ser aplicados com facilidade e eficiência". Assim é que, um arranjo do tipo indicado na Figura 4.33-b deve ser preferido ao mostrado na Figura 4.33-a, por existir um acesso adequado para manutenção da laje e da própria viga.

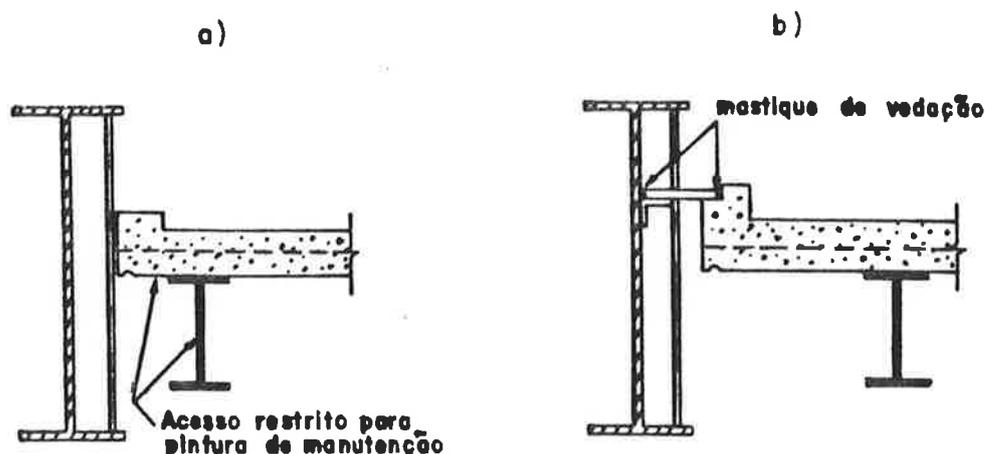


Figura 4.33 - Acesso para manutenção da laje e viga de apoio: a) inadequado; b) adequado. (71)

A própria BS 5493 (71) comenta que "a livre circulação de ar pela estrutura deve ser conseguido". Isto deve ser analisado para lajes compostas associadas a forros falsos, onde possa haver uma concentração excessiva de umidade. O próprio arranjo das "estrias" da laje poderia, numa situação bastante particular, ser pensado de forma a colocar-se longitudinalmente à direção predominante de circulação de ar no ambiente.

4.3.2 A Utilização de Aços Resistentes à Corrosão

"Dentre os metais, o aço é aquele produzido nas maiores quantidades e realmente disponível a preços razoáveis". "Mas ele apresenta um sério inconveniente: a corrosão" (73).

No entanto, de há muito se observa o efeito dos elementos de liga presentes quanto à ocorrência do fenômeno. Boyd (64) afirma que "os elementos minoritários na composição do aço afetam sua resistência à corrosão". Diz ainda que "Larrabee observou há muitos anos atrás que quantidades muito pequenas de cobre (a nível de impureza) causavam significante acréscimo de resistência para alguns aços".

Rozenfeld (65) apresenta inúmeros resultados sobre a influência de uma série de elementos de liga, que podem estar presentes no aço, sobre a resistência à corrosão.

Indica inicialmente que "a utilização de aços de alta liga (com grandes quantidades de elementos de liga presentes) em exposições atmosféricas, exceto em alguns casos especiais, não é praticável economicamente". Quanto aos aços de baixa liga, discute os efeitos devidos à presença, entre outros, de cobre, fósforo, manganês, cromo, molibdênio, etc. Quanto aos resultados indicados cita que "o efeito favorável de pequenas adições de cobre ao aço (0,1 a 0,2%) é conhecido há um bom tempo" e "é muito mais efetivo em atmosferas industriais que em atmosferas marinhas". Ressalta que o pesquisador Vedenkin "descobriu o efeito benéfico do cobre sob condições periódicas de molhamento e secagem do aço". Diz que o "fósforo exerce um efeito particularmente benéfico em combinação com o cobre" e que este efeito ocorre mesmo em atmosferas marinhas, ainda que em menor grau em comparação a ambientes industriais.

Indica que "em aços contendo pequenas quantidades de cobre, o efeito benéfico do manganês é inquestionável" e, quanto ao cromo, que "o efeito deste elemento é mais pronunciado em aços contendo 0,1% de carbono". Finalmente, acrescenta que o "molibdênio é outro elemento de liga que incrementa a resistência dos aços à corrosão atmosférica".

Rozenfeld (65) enfatiza que "dos resultados experimentais até agora obtidos pode-se concluir que a adoção de ligas é um método bastante efetivo para aumentar a resistência à corrosão atmosférica dos aços".

O mecanismo envolvido na melhoria do comportamento dos aços de baixa liga "não foi ainda estabelecido definitivamente em função de que o efeito produzido por cada elemento não foi claramente definido" (65). Vianna (74) acrescenta que "quando vários elementos são adicionados ao mesmo tempo, torna-se impossível prever o resultado".

É conveniente destacar que uma alteração na composição de um aço carbono de baixa liga só produz alterações na velocidade do processo corrosivo quando esta "é determinada pela velocidade da reação do eletrólito" (65); quando, por outro lado, a difusão de substâncias é o fator limitante, a adoção de aços de baixa liga pode não surtir nenhum efeito. Na Figura 4.34 este fato é ilustrado através de duas condições de utilização do aço: imerso em água desaerada e neutra, e sob a ação de uma pequena lâmina d'água (característica da corrosão atmosférica).

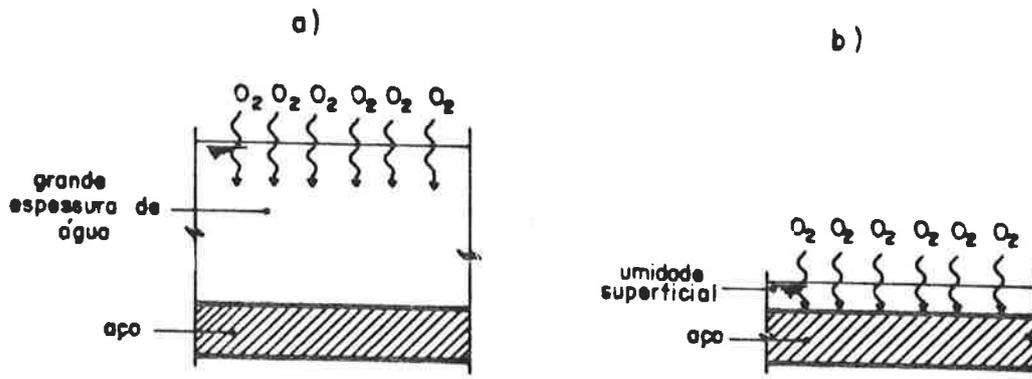


Figura 4.34 - Aço submetido a diferentes meios aquosos: a) imersão; b) fina lâmina.

No primeiro caso, em função da dificuldade de acesso do oxigênio, a reação eletroquímica é controlada pelo processo catódico, sendo que o uso de aço de baixa liga pouca influência terá sobre o fenômeno. No segundo caso, em que não se tem restrição quanto à presença de oxigênio para o processo de redução catódica, a utilização de aços de baixa liga pode levar a grandes vantagens comparativamente ao aço carbono comum.

Como se viu, uma grande preocupação quanto à utilização de aço estrutural aparente em edifícios diz respeito à corrosão atmosférica; e, neste caso, a adoção de aços de baixa liga pode ser bastante benéfica.

4.3.2.1 Aços Aclimáveis

Boyd (64) afirma que os aços de baixa liga são mais resistentes à corrosão que os aço carbono comuns e que, dentre estes, existe um "grupo de ligas que desenvolve um grau particularmente alto de resistência à corrosão atmosférica, sendo chamados de aços aclimáveis ("weathering steels"). Eles contêm pequenas quantidades, em várias combinações, de cobre, cromo, níquel, e/ou fósforo". Este autor acrescenta ainda que, em algumas combinações, algum benefício adicional pode ser trazido pela presença de silício e manganês, e que podem ser benéficiais, também, pequenos incrementos de molibdênio, vanádio, titânio e zircônio.

Vianna (74) diz que os aços aclimáveis "foram introduzidos em 1933 com o desenvolvimento, pela "United States Steel Corporation", do aço "Cor-Ten", originalmente introduzido para utilização em vagões ferroviários". Boyd (64) comenta que, "no entanto, foi somente na década de 60 que a aplicação dos aços aclimáveis em estruturas externas para

pontes, torres, edifícios, tanques e coberturas se difundiu".

Vianna (74) indica que estes aços são enquadrados nas normas ASTM A-242, A-588 e A-606 como "aços de alta resistência e baixa liga". A título de exemplo apenas, encontram-se na Tabela 4.2 as composições químicas previstas pela ASTM A-588.

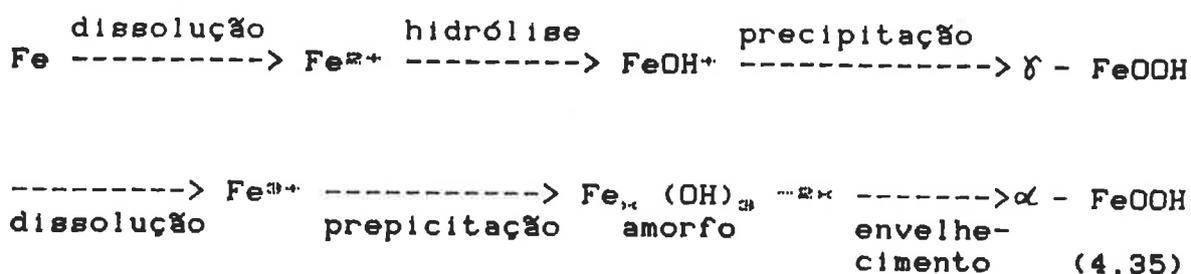
Tabela 4.2 - Exigências de composição química de aços aclimáveis abrangidos pela ASTM A-588.

Elemento	Composição percentual								
	Grav A	Grav B	Grav C	Grav D	Grav E	Grav F	Grav G	Grav H	Grav J
Carbono	0.10-0.19	0.20(a)	0.15 max	0.10-0.20	0.15 max	0.10-0.20	0.20 max	0.20 max	0.20 max
Manganês	0.90-1.25	0.75-1.25	0.80-1.35	0.75-1.25	1.20 max	0.50-1.00	1.20 max	1.25 max	0.60-1.00
Fósforo	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.035 max	0.04 max
Enxofre	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.040 max	0.05 max
Silica	0.15-0.30	0.15-0.30	0.15-0.30	0.50-0.90	0.15-0.30	0.30 max	0.25-0.70	0.25-0.75	0.30-0.50
Níquel	---	0.25-0.50	0.25-0.50	---	0.75-1.25	0.40-1.10	0.80 max	0.30-0.60	0.50-0.70
Cromo	0.40-0.65	0.40-0.70	0.30-0.50	0.50-0.75	---	0.30 max	0.50-1.00	0.10-0.25	---
Molibdênio	---	---	---	---	0.10-0.25	0.10-0.20	0.10 max	0.15 max	---
Cobre	0.25-0.40	0.20-0.40	0.20-0.50	0.30 max	0.50-0.80	0.30-1.00	0.30-0.50	0.20-0.35	0.30 min
Vanádio	0.02-0.10	0.01-0.10	0.01-0.10	---	0.05 max	0.01-0.10	---	0.02-0.10	---
Zircônio	---	---	---	0.05-0.15	---	---	---	---	---
Columbio	---	---	---	0.04 max	---	---	---	---	---
Titânio	---	---	---	---	---	---	0.07 max	0.005-0.030	0.03-0.05

(a) máximo

Os aços aclimáveis são também denominados aços patináveis. Vianna (74) indica que estes aços, quando expostos à atmosfera, "desenvolvem em sua superfície filmes de óxidos aderentes e protetores (pátina), que diminuem ou evitam o prosseguimento da corrosão". Aurélio Buarque de Hollanda (75) dá alguns significados para o termo pátina, dentre os quais pode-se citar: "oxidação das tintas ou vernizes pela ação do tempo", "camada que se forma sobre cobre ou bronze depois de longa exposição à umidade atmosférica", "envelhecimento ou colorido artificial para simulá-lo".

O mecanismo pelo qual esta proteção se processa não encontra ainda uma explicação que seja aceita unanimemente pelos pesquisadores. Vianna (74) afirma que o resultado final do ataque é a formação de "uma camada de ferrugem compacta, aderente e protetora, onde se encontram os elementos de liga, como cobre, cromo, fósforo e enxofre", sendo que, "antes que essa camada estável de ferrugem se forme, outros produtos se precipitam de acordo com a reação:



Diz ainda que alguns estudos comprovam que esta ferrugem "é formada por duas camadas. A primeira, externa, é constituída de lepidocrocita ($\gamma - \text{FeOOH}$), extremamente permeável, não possuindo características protetoras. A segunda, interna, é formada por goetita ($\alpha - \text{FeOOH}$) amorfa", sendo esta "extremamente densa e impermeável aos gases provenientes da atmosfera". Os elementos de liga se situam dispersos nesta camada, sendo considerados catalisadores da formação de goetita amorfa".

Enquanto afirma que "o mecanismo envolvido no aumento da resistência à corrosão dos aços de baixa liga não foram ainda estabelecidos definitivamente"; Rozenfeld (65) diz que algum progresso existe quanto à avaliação deste efeito para alguns elementos, particularmente "do cobre em aços de baixa liga". Cita a existência de três postulados que procuram explicar a atuação do cobre, havendo um destaque para o fenômeno de proteção anódica bem como para a alteração das condições de condensação e absorção de umidade pela superfície.

Boyd (64) cita a comparação proposta pelo pesquisador Misawa quanto à formação de ferrugem sobre um aço carbono comum e outro de baixa liga (Figura 4.35). Segundo este, o $\delta - \text{FeOOH}$ produzido não se concentra, no caso do aço comum, sobre sua superfície; "se mistura com grãos grosseiros de Fe_2O_3 , e α , β ou $\gamma - \text{FeOOH}$ ", propiciando que "fissuras se desenvolvam prontamente, permitindo o acesso de água à superfície.

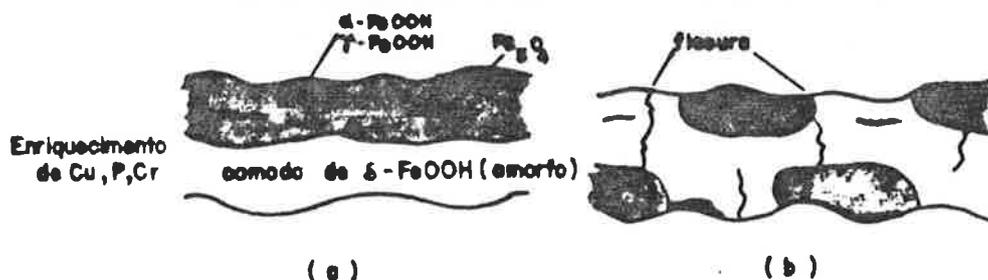


Figura 4.35 - Representação esquemática da camada de ferrugem sobre aços após longa exposição à atmosfera: a) baixa liga; b) comum.

Vianna (74) afirma que a velocidade de corrosão do aço patinável, semelhante à do comum nos estágios iniciais, "diminui consideravelmente à medida que o tempo de exposição aumenta". Menezes (76) chama a atenção para o fato de que o tempo para a formação completa da pátina protetora "varia em função do tipo de atmosfera em que se encontra exposto, levando em média de dois a três anos".

Vianna (74), em concordância com preocupação também exposta por Menezes (76), afirma que "verificou-se que a camada de ferrugem só se forma satisfatoriamente quando a superfície do aço é alternadamente molhada por chuva ou condensação de umidade, e secada pela ação do sol ou de ventos. Em condições de permanente umedecimento, ou condensação prolongada, a resistência do aço patinável pode ser reduzida à do aço carbono comum".

Os aços aclimáveis podem ser utilizados sem nenhuma proteção adicional ou podem ser revestidos. Esta opção, segundo Menezes (76), pode ser função do tipo de "atmosfera em que ficará exposto, do projeto, como também das condições de utilização", sendo que a ausência de revestimento "é recomendada em locais que possibilitem a formação completa da camada de óxido com características protetora". Cita ainda, este último autor, que estas condições favoráveis são normalmente encontradas "em atmosfera industrial não muito agressiva, rural, urbana e marítima (distante aproximadamente 600 m da orla marítima)".

Adam (51) indica um comportamento favorável em atmosferas que contenham enxofre, enquanto Vianna (74), que dentre os fatores ambientais que influenciam a corrosão dos aços patináveis são "críticos os teores de dióxido de enxofre e cloreto existentes na atmosfera".

Menezes (76) afirma que o comportamento em atmosferas industriais pouco agressivas é bastante favorável e que, nas altamente agressivas, a resistência à corrosão é menor, porém, "sempre superior ao aço carbono comum".

Vianna (74) alerta ainda para o fato de "não ser recomendado o uso desses aços, sem proteção, para atmosferas industriais altamente corrosivas ou condições marinhas severas" sem uma avaliação bastante cuidadosa. Cita ainda experiências feitas com o Cor-Ten em ambientes industriais agressivos onde, ainda que necessário o revestimento, este aço apresentou "nítida vantagem sobre o aço carbono, sob o ponto de vista de corrosão e economia".

Menezes (76) diz que "o caráter protetor do óxido formado em atmosfera marítima não é tão intenso como o de uma industrial" e cita que, ainda assim, "a resistência à corrosão é superior quando comparada ao aço carbono".

Vianna (74) cita experiências com o aço Cor-Ten onde se evidenciou que, posicionado próximo ao mar, sujeito a receber a névoa salina, apresenta ainda um desempenho superior sendo que, no entanto, "as perdas por corrosão são muito mais altas que as verificadas em atmosfera industrial".

Magalhães (77) indica que, para aplicações marítimas, partiu-se para duas linhas distintas de desenvolvimento de aços adequados: uma relativa a aços não revestidos e a outra referente a aços de grande aderência à pintura. Afirma que dentre os materiais pertencentes a este segundo grupo, que propiciam ciclos de manutenção "três vezes maiores do que os aços comuns" encontram-se os de tipo aclimáveis.

Quanto às atmosferas urbanas Vianna (74) indica que o bom desempenho tem tornado este o maior campo de utilização para os aços patináveis, em concordância com o exposto por Menezes (76).

Com relação à quantificação da velocidade de corrosão nos aços aclimáveis, a COSIPA (78) fornece os resultados constantes da Figura 4.36.

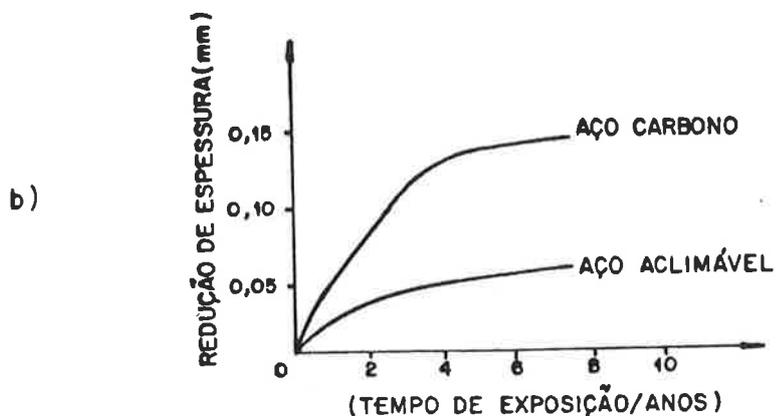
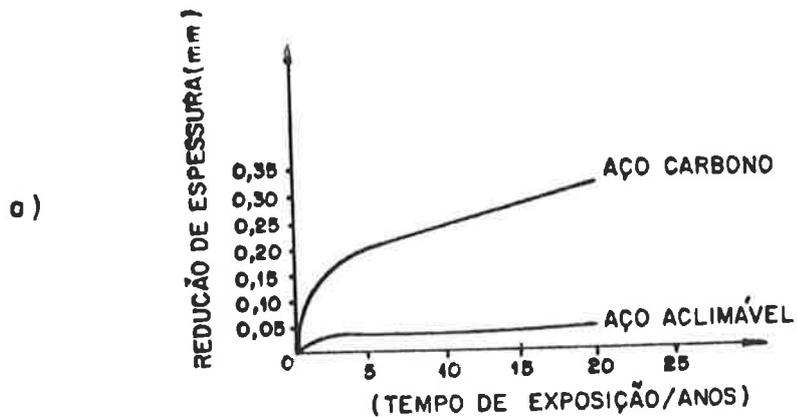


Figura 4.36 - Resultados de testes com aços aclimáveis, indicados pela COSIPA, em diferentes atmosferas: a) industrial; b) marinha-moderada; c) semi-rural.

A Usiminas (79), por sua vez, cita resultados de ensaios comparativos, entre um aço aclimável do tipo do USI-SAC-50 (por ela produzido) e outro do tipo ASTM A-36, realizados em atmosferas do tipo industrial no Japão, conforme se indica na Figura 4.37.

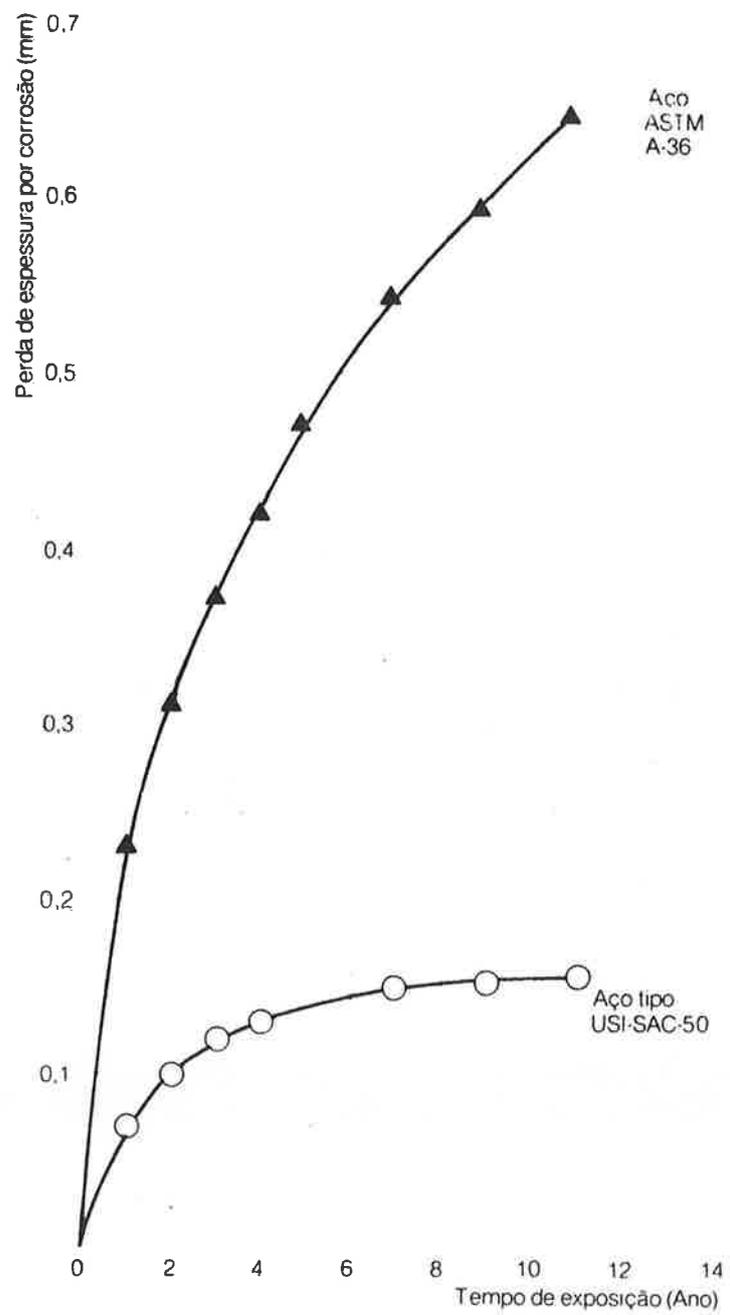


Figura 4.37 - Estudo comparativo entre o desenvolvimento da corrosão em aço aclinável e do tipo ASTM A-36 apresentado pela Usiminas.

Wolyneec (80) apresenta resultados de ensaios realizados com materiais metálicos expostos a diferentes atmosferas ao longo de seis anos. Dentre os materiais metálicos estudados indica-se, na Tabela 4.3, a composição química do aço carbono e dos aços estruturais testados.

Tabela 4.3 - Composição química do aço carbono e aços estruturais ensaiados.

ELEMENTO	AÇO CARBONO	A-36	A-572	A-588
Carbono (C), %	0,03	0,18	0,15	0,14
Silício (Si), %	< 0,01	0,28	0,25	0,28
Manganês (Mn), %	0,31	0,72	1,00	0,81
Fósforo (P), %	0,010	0,020	0,035	0,034
Enxofre (S), %	0,004	0,038	0,049	0,030
Cromo (Cr), %	0,011	0,06	0,07	0,47
Níquel (Ni), %	0,02	0,05	0,06	0,11
Molibdênio (Mo), %	0,01	0,03	0,11	0,03
Cobre (Cu), %	< 0,01	0,09	0,11	0,34
Nióbio (Nb), %	-	-	0,034	0,036

O estudo, realizado no estado de São Paulo e distante da região costeira, baseou-se em três diferentes estações de corrosão atmosférica: a ECA IPT, localizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas, no bairro do Butantã em São Paulo; a ECA Santo André, localizada na área urbana da cidade de Santo André, pertencente à zona metropolitana de São Paulo; a ECA Lorena, localizada em zona rural desta cidade do interior do estado.

Os resultados obtidos para as três diferentes estações citadas podem ser vistos, respectivamente, nas Figuras 4.38, 4.39 e 4.40.

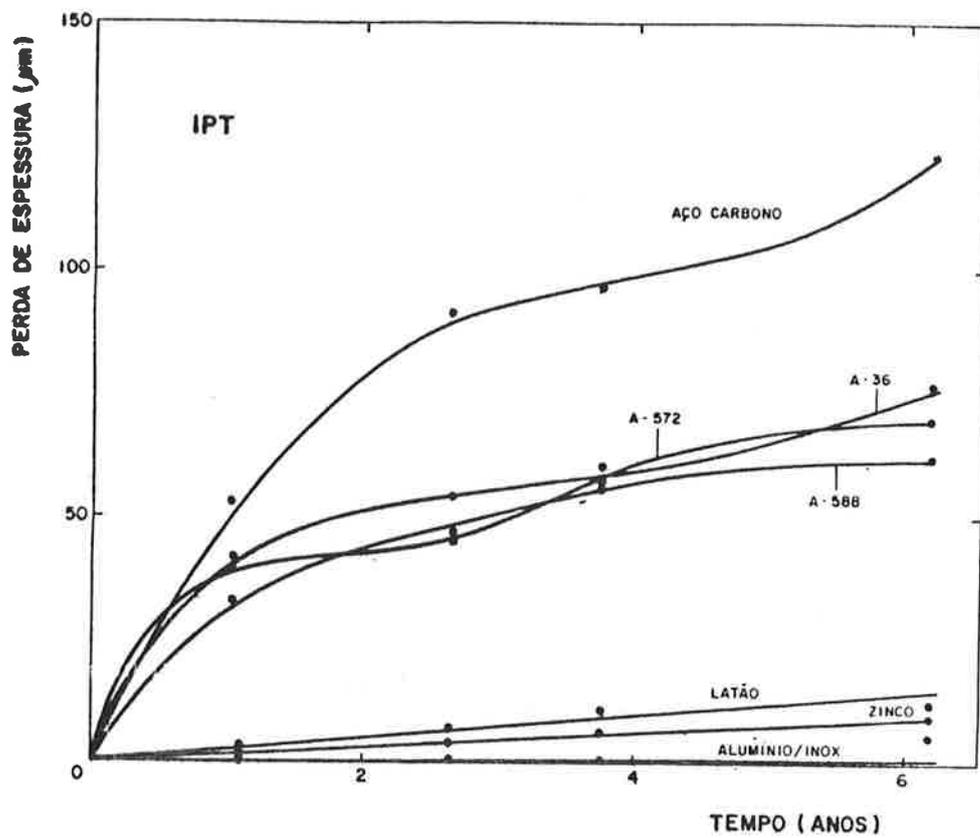
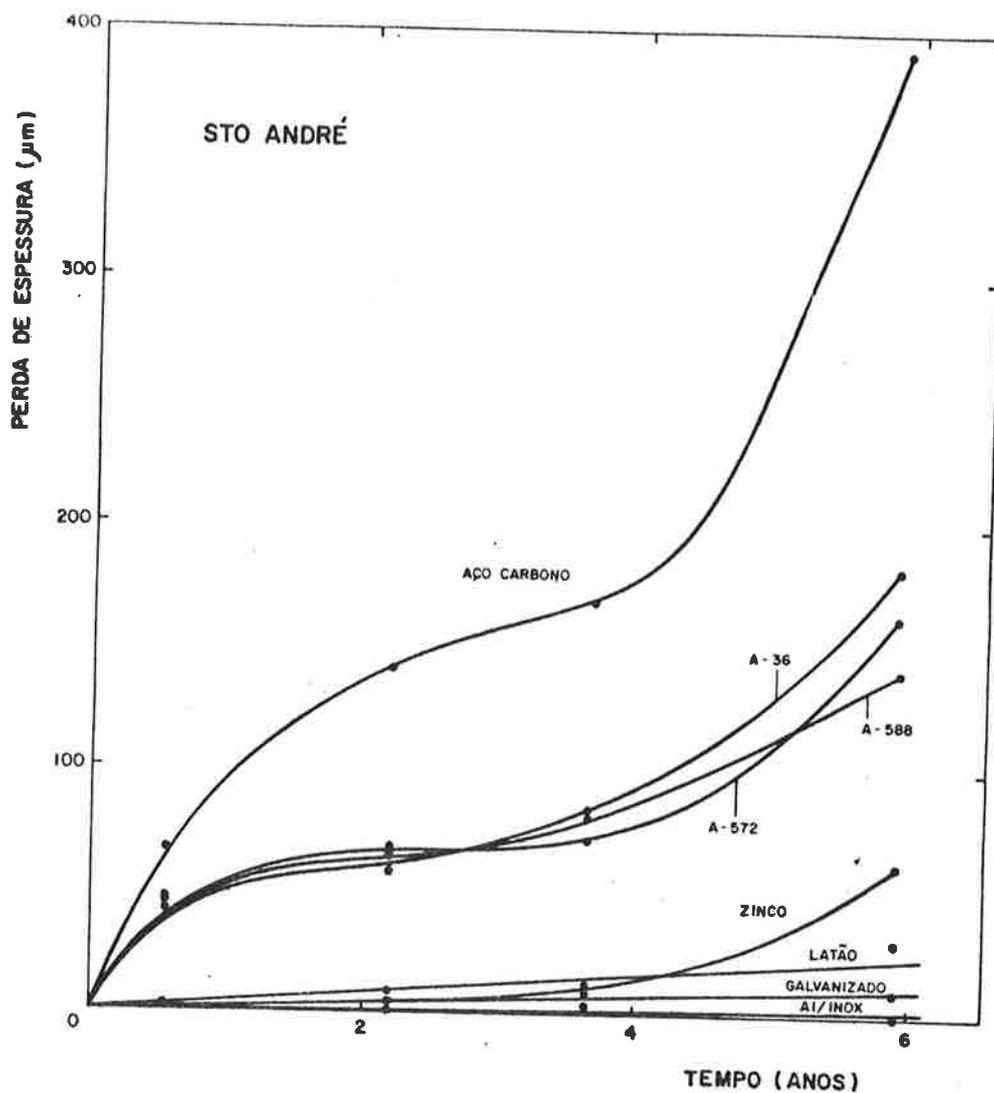


Figura 4.38 - Perda de espessura em função do tempo na ECA-IPT.



. Figura 4.39 - Perda de espessura em função do tempo na ECA-Santo André.

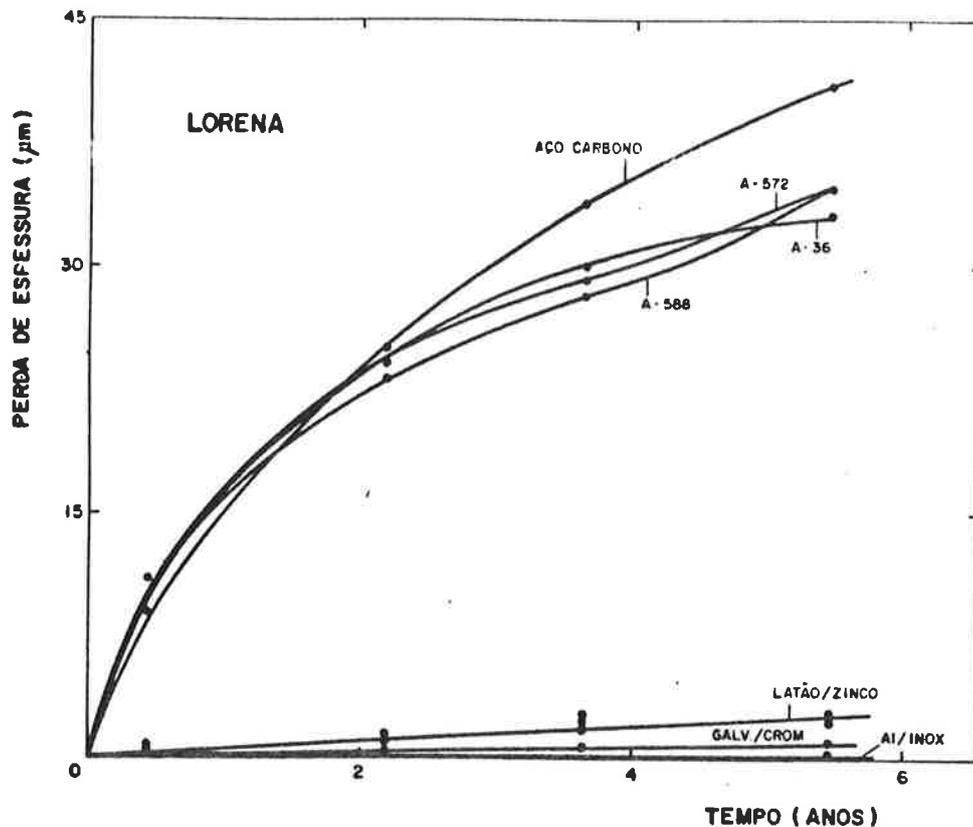


Figura 4.40 - Perda de espessura em função do tempo na ECA-Lorena.

Quanto à utilização de aços patináveis revestidos, o desempenho do componente costuma ser bastante favorável conforme comentam Vianna (74) e Magalhães (77). Menezes (76) afirma que este desempenho é "no mínimo duas vezes superior em relação ao mesmo revestimento aplicado no aço carbono comum".

Este comportamento favorável pode ser explicado por uma sinergia de mecanismos. Em primeiro lugar a aderência da pintura é otimizada, segundo Magalhães (77), o que favorece a formação de uma película de revestimento eficaz; no caso da existência de uma eventual falha do sistema, ou mesmo em função da própria permeabilidade da tinta, os produtos de corrosão formados no caso dos aços aclináveis, segundo Menezes (76), são bem menos volumosos que no caso de aços comuns, diminuindo a tendência de destacamento da película de pintura.

4.3.2.2 Disponibilidade no Mercado Nacional

Os aços acimáveis são hoje produzidos por três grandes usinas siderúrgicas brasileiras: a Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, a USIMINAS - Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais e a Companhia Siderúrgica Nacional - CSN.

A NBR 5903/83 (33) define chapa fina como aquela "cuja espessura é igual ou inferior a 5,00 mm e igual ou superior a 0,30 mm"; no entanto, para as lajes compostas, espessuras superiores a 2,00 mm não são comumente utilizadas. Passa-se, portanto, a uma listagem do material de interesse produzido pelas siderúrgicas citadas, levantados a partir dos catálogos de produtos destes fabricantes. Existiu uma tendência inicial de fabricação de aços acimáveis de alta resistência mecânica sendo, posteriormente, desenvolvidos aços com mesmo comportamento frente à corrosão, porém com resistência mecânica um pouco inferior, mais compatível com as necessidades da construção civil.

A COSIPA (78,81) dispõe do material cujas características encontram-se condensadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características dos aços aclimáveis produzidos por laminação a frio pela COSIPA, disponíveis sob a forma de chapas finas: a) composição química; b) propriedades mecânicas.

a)

PRODUTO	C máx	Mn máx	P máx	S máx	Si máx	Cu	Cr	Ni	Nb
COS-AR-COR 500	0,14	1,20	0,030	0,015	0,20	0,20/0,50	0,40/0,70	--	(1)
COS-AR-COR 400	0,06	0,25	0,030	0,010	0,10/0,20	0,15/0,20	0,030/0,050	0,050/0,060	(1)

(1) Nb, V, Ti poderão, a critério do produtor, ser utilizados combinados ou separadamente de modo que $Nb + V + Ti < 0,15\%$.

b)

PRODUTO	Espessura (mm)	LE mín (N/mm ²)	LR mín (N/mm ²)	Alongamento mínimo (%)	Dobramento Transversal a 180° (diâmetro)
COS-AR-COR 500	0,70 a 3,00	320	480	22 (l ₀ =50 mm)	zero
COS-AR-COR 400	0,50 a 3,00	215	350	34 (l ₀ =50 mm)	zero

A Usiminas, por sua vez, cita em seu catálogo (79), a disponibilidade de aço aclimável com pequena espessura, conforme se indica na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Características dos aços aclináveis produzidos por laminação a frio pela Usiminas, disponíveis sob a forma de chapas finas: a) composição química; b) propriedades mecânicas.

a)

PRODUTO	C máx	Si	M _n máx	P máx	S máx	Cu	Ti máx	Cr	Outros
USI-SAC 50	0,18	0,15 a	1,40	0,030	0,030	0,25 a	0,15	0,40 a	
		0,55				0,50		0,65	

b)

PRODUTO	Espessura (mm)	LE mín (N/mm ²)	LR mín (N/mm ²)	Alongamento mínimo (%)	Dobramento a 180° (diâmetro calço)
USI-SAC 50	0,80 a	343	461	22 (l ₀ =50 mm)	1,5 x espessura
	2,00				

A CSN indica em seu catálogo (82) a disponibilidade de aços patináveis com espessuras superiores aos 3 mm e, portanto, de menor interesse ao uso em lajes compostas.

4.3.2.3 A Utilização na Laje Composta

O "NACE" (68) recomenda que se localize os componentes metálicos estruturais em regiões de menor agressividade; neste aspecto há que se ressaltar a disposição da chapa de aço constituinte da laje composta em uma posição de relativa proteção contra o meio agressor (Figura 4.41).

Há que se destacar ainda as diferenças existentes entre um uso em ambiente residencial ou industrial; e, mesmo no caso de uma utilização habitacional, as várias partes do edifício podem ter características distintas e relevantes quanto ao comportamento à corrosão.

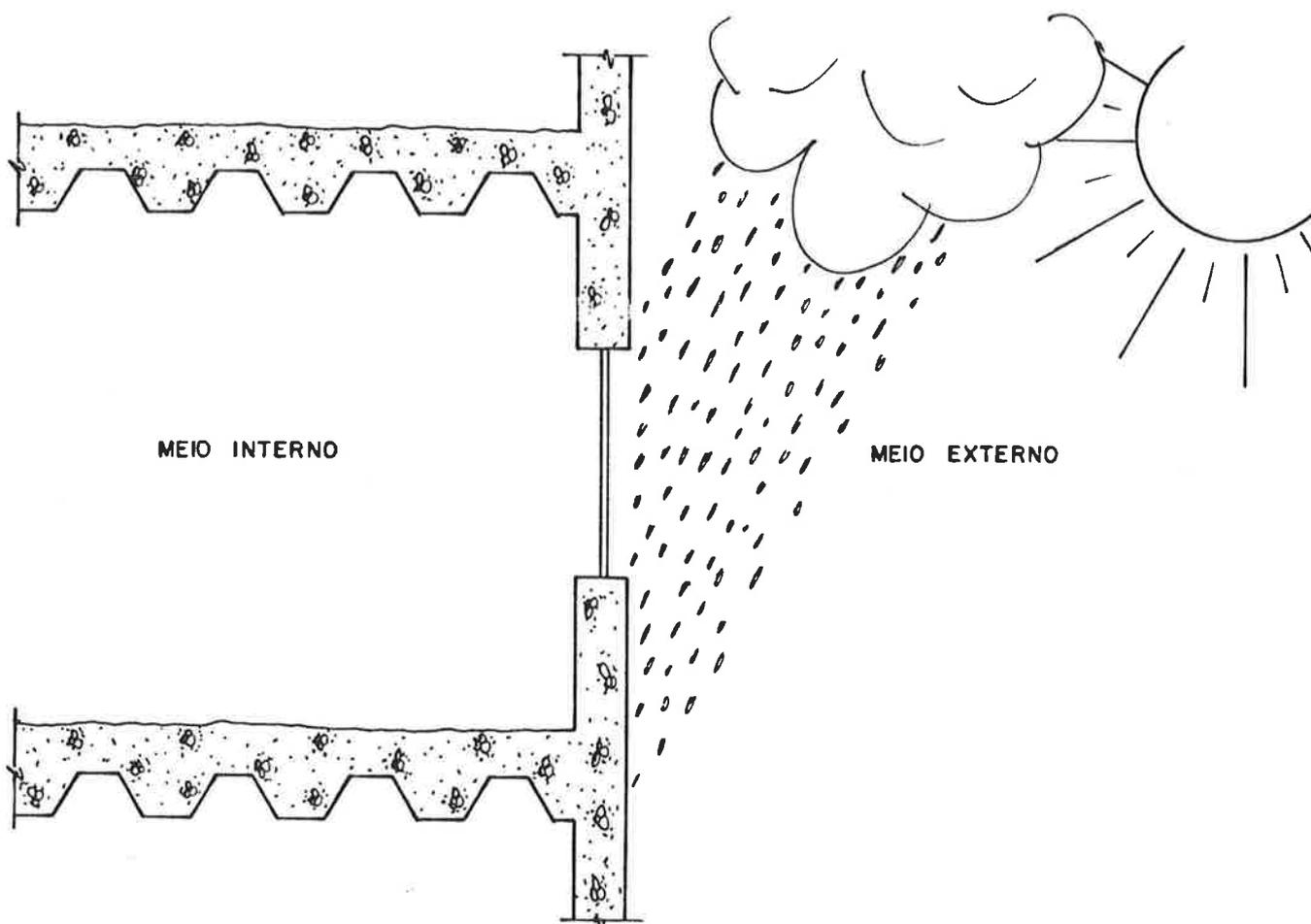


Figura 4.41 - A laje composta situada em ambiente interno.

Relembre-se a importância dos umedecimentos e secagens alternados para a formação de uma camada protetora adequada. Considerando-se a inexistência de molhamento direto por água de chuva, fica consignada uma preocupação quanto a um desempenho satisfatório dos aços acimáveis nesta situação. Apesar de não se descrever aqui nenhum estudo experimental a respeito do assunto, discute-se brevemente a possibilidade de condensação de umidade sobre a chapa de aço em função das características do ambiente em que está inserida.

Tem-se normalmente vapor d'água difundido no ar de um ambiente, em quantidades variáveis no tempo e no espaço; a pressão desse "ar úmido", portanto, é a soma da pressão do ar seco com a pressão do vapor d'água (P_v).

Essa difusão de vapor d'água no ar pode ocorrer até um certo limite, quando ocorre a saturação do mesmo. A pressão de vapor d'água saturante () - da mesma forma que a quantidade de água presente - depende da temperatura do ar, conforme se vê na Tabela 4.6 indicada por Landi (83).

Tabela 4.6 - Pressão de vapor d'água saturante em função da temperatura.

t (°C)	π (mm Hg)
0	4,58
10	9,21
20	17,53
30	31,81
40	55,31
50	92,52
60	149,39
70	233,69
80	355,20

A relação entre a pressão de vapor d'água existente e a pressão saturante para as condições reinantes se denomina umidade relativa:

$$y = \frac{P_v}{\pi} \times 100 \quad (\%) \quad (4.36)$$

Alcançando-se o limite de saturação ou, em outras palavras, para condições de $y = 100\%$, tem-se condensação da água. Note-se que, a maiores temperaturas, o ar é capaz de difundir uma quantidade maior de vapor d'água.

Portanto, a partir de uma condição inicial de existência de uma massa "g" de água difundida no ar pode-se chegar à condensação por abaixamento da temperatura ou por acréscimo de vapor d'água difundido, conforme ilustra a Figura 4.42.

A chapa de aço da laje composta, possuindo um alto coeficiente global de transmissão de calor, pode-se tornar, em certas condições, mais fria que o ar do ambiente o suficiente para provocar a condensação pelo primeiro caminho citado. A segunda situação é característica de áreas tais como banheiros e cozinhas onde, em função da alta produção de vapor em certos momentos, alcança-se umidade relativa de 100%.

Em termos da quantificação da umidade relativa reinante nos ambientes de uma residência em São Paulo, pode-se observar os dados fornecidos pelo Ministério da Agricultura, apresentados por Landi (83) conforme a Tabela 4.7.

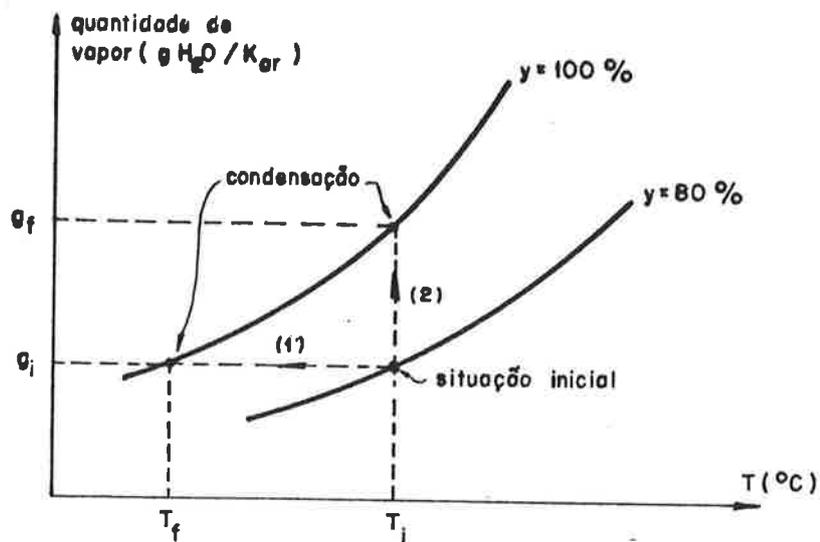


Figura 4.42 - A condensação do vapor d'água.

Tabela 4.7 - Variação da umidade relativa (y) ao longo do ano em São Paulo (média de 20 anos: 1956 a 1975).

	y (%)
janeiro	80,3
fevereiro	81,0
março	81,3
abril	81,1
maio	80,4
junho	78,7
julho	77,6
agosto	74,6
setembro	77,5
outubro	80,8
novembro	79,2
dezembro	80,5

Esta Tabela dá indicações da umidade relativa externa; não possuindo comprovações experimentais quanto às variações internas, este autor consideraria que, em áreas do tipo de banheiros e cozinhas a umidade relativa variaria entre um mínimo pouco superior ao valor externo e os 100% correspondentes à condensação. No caso das áreas secas (salas, dormitórios), tem-se duas tendências opostas: a presença de pessoas gera um aumento da produção de vapor, enquanto as maiores temperaturas em relação ao meio externo levariam a uma maior capacidade de difusão. Como consideração preliminar poder-se-ia adotar uma semelhança com os valores externos.

Estudos experimentais fazem-se necessários para verificação do comportamento dos aços patináveis nestas condições.

Ainda quanto à formação da pátina protetora há que se detectar a existência de regiões críticas quanto à concentração de umidade condensada; a coleta e reservação de água por um período mais prolongado por essas regiões pode gerar a criação de pontos críticos quanto ao mecanismo de funcionamento dos aços patináveis. Os pontos críticos indicados na Figura 4.23 anteriormente mostrada são possíveis armazenadores de umidade condensada.

Menezes (76) chama a atenção para a dissolução dos óxidos formados nas primeiras idades pela água, destacando o "cuidado a ser tomado quanto ao manchamento de materiais adjacentes". A condensação e o posterior gotejamento de umidade das chapas poderia provocar o eventual manchamento inclusive de forros falsos associados à laje; para este último caso a adoção de uma barreira impermeável (plástico por exemplo) pode se mostrar interessante (Figura 4.43).

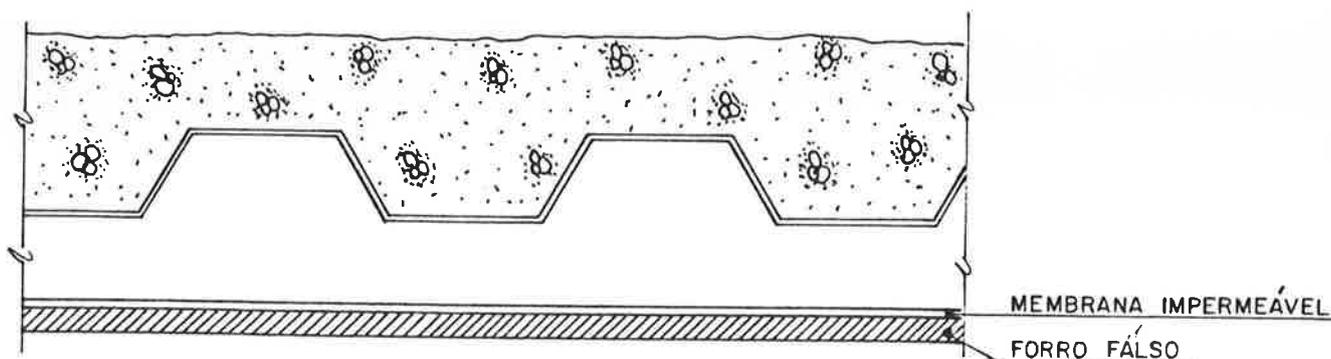


Figura 4.43 - Solução para evitar gotejamento de óxidos sobre o forro-falso.

Para contornar o problema da solubilidade dos óxidos iniciais formados sobre os aços aclimáveis, os japoneses têm feito uso de um tratamento superficial destes denominado "weather coat process" que, basicamente, "permite a formação de um filme de óxidos estável sobre o aço aclimável" (73).

A utilização de aços patináveis não revestidos para a laje composta pode não ser muito favorável no aspecto psicológico, devido à aparência de material corroído na face acima dos habitantes. Do ponto de vista de iluminação do ambiente pode também gerar algumas deficiências.

A utilização de perfis fechados (Figura 4.44) diminui, por um lado, a superfície metálica diretamente em contato com o meio agressivo enquanto, por outro lado, cria uma região interna que pode ser mais precária ainda quanto ao desenvolvimento de uma camada protetora de óxidos.

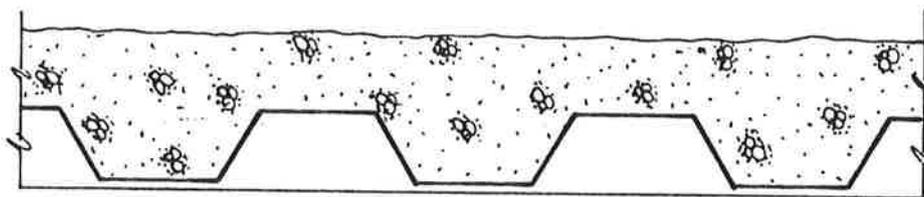


Figura 4.44 - Os perfis fechados criando espaços com menor contato com o meio ambiente.

Quanto à adoção de revestimentos, tem-se o efeito sinérgico favorável anteriormente explicitado. Ressalte-se que os aços aclimáveis constituem-se em boa base para as pinturas e mesmo para a galvanização. Gnecco (84) indica que o preparo de superfície de um aço patinável para a aplicação de revestimentos é análoga à necessária a um aço carbono comum.

Os aços aclimáveis disponíveis no mercado nacional possuem muitas vezes resistência mecânica superior em relação aos aços estruturais usados normalmente na construção civil (ASTM A-36 por exemplo). Apesar de um custo por quilograma um pouco superior, a menor quantidade de material necessário para a confecção de uma estrutura pode compensar economicamente segundo Vianna (74). Menezes (76) cita estudos que indicam uma economia global de peso de até 17% em função da utilização de aços aclimáveis.

No caso das lajes compostas esta economia de material aço apresenta-se improvável na medida em que o fator limitante do dimensionamento é muitas vezes a aderência concreto-chapa de aço dobrada.

A utilização de aços mais resistentes, no entanto, pode significar uma reserva adicional de resistência no caso de incêndio - discutível conforme será visto no próximo capítulo - e menores restrições quanto à perda de espessura devido à corrosão, isto é, menores quantidades de aço são ainda capazes de absorver os esforços de flexão.

Estes aços, no entanto, são normalmente mais duros, o que pode trazer consequências para as operações de conformação da chapa, tais como trabalhar-se com raios de curvatura maiores nas dobras.

4.3.3 A Proteção Pelo Uso do Zinco

Uma das formas mais utilizadas na proteção do aço contra a corrosão é o revestimento com uma camada relativamente fina de algum outro metal.

Dentre os metais comumente utilizados pode-se citar: zinco, chumbo, estanho, cobre, níquel, cromo, cádmio e alumínio. Devido a uma série de vantagens que apresenta, o zinco é o mais utilizado dentre estes metais (85), e é sobre ele que se discorre a seguir.

4.3.3.1 O Princípio da Proteção

A criação de uma camada de zinco, assim como qualquer outro revestimento metálico, provoca um isolamento do aço em relação ao meio corrosivo, criando uma proteção por "barreira" do metal-base.

No entanto, a atuação do zinco não se restringe apenas a servir de anteparo como descrito acima. Ao observar-se a Tabela 4.1, onde os metais estão classificados segundo seus potenciais de eletrodo padrão, nota-se claramente que o potencial de redução do zinco (+0,763) é superior ao do aço (-0,440). Na célula eletrolítica formada por eletrodos de aço e zinco respectivamente (Figura 4.45) este último atua como anódio, corroendo-se, enquanto o primeiro assume o papel de cátodo permanecendo intacto. Dá-se origem assim à proteção catódica do aço, isto é, o uso de um metal de proteção com potencial de oxidação superior (anódico em relação ao aço), faz com que o metal-base atue como cátodo da reação galvânica, prevenindo-se portanto, a sua corrosão.

Uma característica importante do revestimento com zinco é que, no caso de uma falha da película, seja por riscamento ou mesmo por defeito da operação de aplicação, a corrosão sacrificial do zinco origina um tamponamento deste defeito (Figura 4.46), criando uma barreira entre o metal-base e o meio corrosivo.

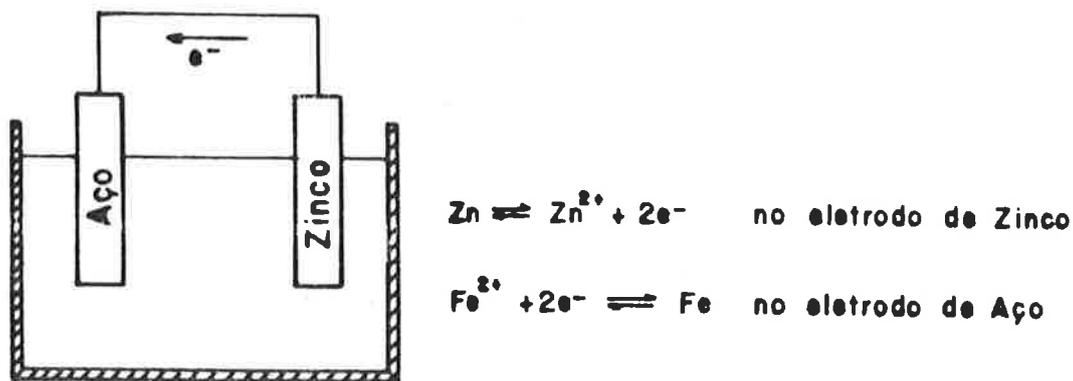


Figura 4.45 - Caráter anódico do zinco em relação ao aço.

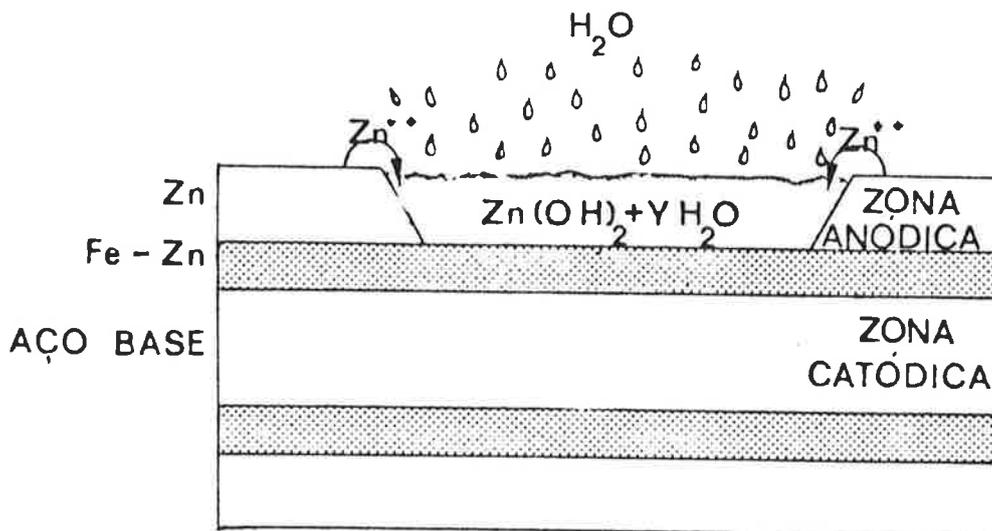


Figura 4.46 - A proteção de eventuais falhas do revestimento de zinco.

Sabe-se que o potencial de oxidação nos fornece indicação quanto ao sentido em que a reação de corrosão se processa, não determinando porém a velocidade de ocorrência do fenômeno, a qual é função de outros parâmetros tais como as impurezas existentes no metal, a natureza do produto de corrosão formado e a natureza do meio.

É neste sentido que, segundo Adam (86), se explica o fato de, apesar de possuir um potencial de oxidação superior ao do aço, o zinco se corroer numa velocidade bastante inferior ao mesmo em vários tipos de exposição. É esta característica que torna viável a proteção de um material relativamente barato, o aço, às custas de um mais caro, o zinco.

Ainda segundo Adam (51), numa atmosfera seca a corrosão do zinco dar-se-ia no sentido de formar óxido de zinco (ZnO), de pequeno efeito protetor. No entanto, na presença de umidade e de dióxido de carbono há a formação de carbonato básico de zinco, ao qual é atribuída a excelente resistência do zinco em atmosferas comuns.

4.3.3.2 A Aplicação do Revestimento de Zinco

O zinco pode ser aplicado por processos diversos (87), dentre os quais pode-se destacar:

- galvanização;
- metalização;
- eletrodeposição;
- sherardização;
- pintura.

Dentre estes dar-se-á ênfase à galvanização e metalização, discutindo-se ainda brevemente as pinturas ricas em zinco, em função da aplicabilidade às lajes compostas ora enfocadas.

4.3.3.2.1 Galvanização.

O processo da galvanização ou zincagem por imersão a quente, consiste, basicamente, "na preparação da superfície da peça previamente, seguida de imersão em banho de zinco líquido, e eventualmente com posterior tratamento químico" (88).

Quando mergulhado no banho de zinco fundido, cuja temperatura usual encontra-se por volta dos 450° C, o aço entra em contato direto com o zinco, originando reações químicas que determinam a formação de uma camada de liga entre esses dois metais (89). Durante a retirada do componente do banho, uma certa quantidade de zinco é arrastada, dando origem a uma camada de zinco puro sobreposta à anterior (Figura 4.47).

A aderência do revestimento é garantida através da formação das camadas de ligas Fe - Zn; a dureza do revestimento é compatível com a do metal-base, sendo que a mesma aumenta nos estratos mais próximos ao aço (89).

DUREZA VICKERS

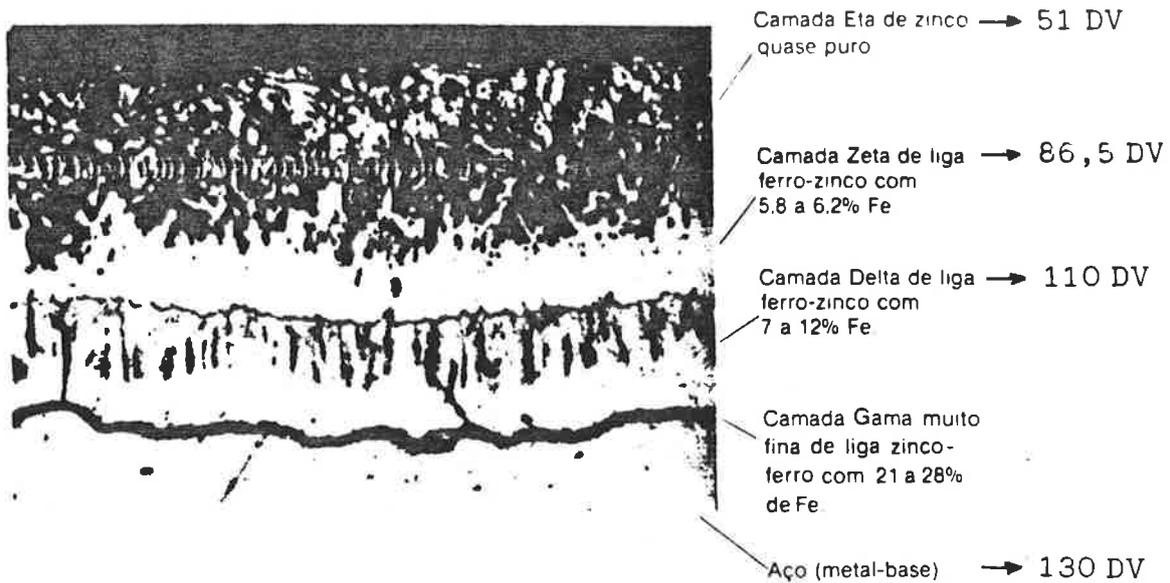


Figura 4.47 - Micrografia de revestimento típico de aços galvanizados e durezas das camadas constituintes. (89)

A formação do revestimento pode ser influenciada por alguns fatores (89), tais como:

- a escolha do metal-base.

Elementos como carbono, fósforo, enxofre, manganês e silício em particular ativam a reação entre o zinco e o aço.

Os aços acimáveis, em especial, são mais facilmente galvanizáveis que os aços-carbono comuns.

- o estado da superfície.

Quanto mais rugosa maior a superfície passível de ter contato com o banho de zinco e, portanto, maior a tendência de formação de camadas espessas. Neste sentido, o jateamento das peças favorece o espessamento do revestimento.

- velocidade de imersão e remoção.

Regulam a homogeneidade bem como a espessura da camada de zinco puro externa.

- temperatura do banho.

O seu aumento implica numa aceleração da reação entre o zinco e o ferro.

- tempo de imersão.

O crescimento do revestimento é muito rápido no início, decaindo de velocidade a seguir.

- composição do banho.

Pequenas adições de alumínio podem inibir a formação de ligas intermediárias Fe - Zn por um certo período.

- velocidade de resfriamento.

Um resfriamento lento pode favorecer a que a formação das ligas Fe - Zn alcance a superfície externa por difusão do ferro; se por um lado esta formação não reduz a resistência à corrosão, pode ser indesejável esteticamente na medida em que apresenta uma tonalidade mais escura.

A galvanização pode ser conseguida por dois caminhos:

- galvanização de materiais básicos, que servem como insumo para a confecção de estruturas (galvanização de laminados planos);
- galvanização de componentes estruturais após a sua fabricação (galvanização de componentes acabados). É sob este enfoque que se passa, a seguir, a uma análise de aspectos importantes quanto a projetos adequados.

4.3.3.2.1.1 Galvanização de Laminados Planos

As chapas galvanizadas, também conhecidas por chapas zincadas, são produzidas no Brasil pela CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), podendo ser adquiridas na forma de chapas ou bobinas (82).

As chapas zincadas são produzidas dentro das dimensões limite indicadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Dimensões-limite das chapas galvanizadas da CSN. (72)

Dimensões	Zincagem continua	Zincagem semi-continua	
		0,35 a 0,43	0,50 a 3,40
Espessura	0,30 a 1,95	0,35 a 0,43	0,50 a 3,40
Comprimento	915 a 4780	1830 a 3000	1830 a 4000
Largura	600 a 1220	600 a 1220	600 a 1220

As dimensões - padrão bem como a massa unitária das chapas galvanizadas podem ser vistas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Chapas galvanizadas padrão produzidas pela CSN. (72)

Espessuras-padrão mm	Massa kg/m ²	Larguras (mm)			Comprimentos-padrão mm
		Minima	Máxima	Padrão	
0.30	2.40	600	1000	1000	2000 e 3000
0.35	2.80				
0.43	3.44				
0.50	4.00		1070	1000	
0.65	5.20				
0.80	6.40				
0.95	7.60		1117	1000 e 1200	
1.11	8.88		1220		
-1.25	10.00				
1.55	12.40				
1.95	15.60				
2.30	18.40		1000		
2.70	21.60				
3.40	27.20				
				1000 e 1200	

As bobinas zincadas têm diâmetro interno de 510 mm aproximadamente e externo de 1680 mm no máximo, sendo fornecidas com massa não superior a 20.000 kg (a massa usual é de 5000 kg).

Estes produtos, além da distinção quanto ao fornecimento em chapas ou bobinas, são classificados quanto a:

- processo de galvanização.

A CSN opera dois processos de galvanização a quente: um contínuo, que gera bobinas e chapas zincadas (BZC, CZC), e um semi-contínuo, onde são produzidas unicamente chapas (CZS).

O processo contínuo dá origem a revestimentos de maior aderência, permitindo dobramentos posteriores acentuados sem danos à proteção:

- grau de estampagem.

As chapas e bobinas do processo contínuo podem ser subdivididas quanto à capacidade de conformação crescente em: grau comum (ZC), grau estampagem (ZE) e grau estampagem especial resistente ao envelhecimento (ZEE).

A composição química do aço-base e as características mecânicas das CZC e BZC constam da Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - CZC e BZC produzidas pela CSN.

Grau	Composição química (%)				Características mecânicas		
	C máx	Mn máx	P máx.	S máx.	LR N/mm ²	Alongamento mínimo em 50 mm (%)	
						e ≤ 0,6	e > 0,6
ZC	0,15	0,60	0,05	0,05	—	—	—
ZE	0,10	0,45	0,03	0,03	320 a 400	27	28
ZEE	0,08	0,45	0,03	0,03	320 a 380	30	31

Nota: e = espessura da chapa em milímetros.

- espessura do revestimento.

AS CZC e BZC são classificadas quanto à quantidade de zinco presente no revestimento segundo a Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Classificação quanto à quantidade de zinco do revestimento.

Tipo de revestimento	Massa mínima de revestimento de zinco (1) em g/m ²		Espessura mínima (3) de zinco em μ m	
	Ensaio individual	Média do ensaio triplo	Ensaio individual	Média de de ensaio triplo
X	não especificada	não especificada	-	-
A	160	170	23	24
B	250	260	35	37
C	315	335	45	47
D ⁽²⁾	390	410	55	58
E ⁽²⁾	450	470	64	66
F ⁽²⁾	510	530	72	75
G ⁽²⁾	580	610	82	86

As CZS são normalmente produzidas só com revestimento tipo C.

= tipo de acabamento do revestimento.

Os acabamentos são classificados em: cristais normais, minimizados ou superfície extra-lisa.

No acabamento com cristais normais ocorre um crescimento dos cristais de zinco durante a solidificação do metal, dando ao revestimento a conhecida aparência de "flores".

Um tratamento dado anteriormente à solidificação do zinco é capaz de restringir o crescimento dos cristais, dando origem ao revestimento com cristais minimizados, cuja superfície é mais lisa que a anterior.

A superfície extra-lisa pode ser conseguida pela passagem do componente com cristais minimizados por um laminador de encruamento.

O crescimento dos cristais dá-se a partir de pontos denominados centros nucleadores. Note-se que o tamanho das "flores" não dá indícios da espessura da galvanização.

4.3.3.2.1.2 Galvanização de Componentes Acabados

Em função da existência de chapas e bobinas galvanizadas que permitem o dobramento e estampagem sem danos relevantes ao revestimento de zinco, a aplicação do processo a uma chapa de aço comum após a sua perfilação não aparece como opção atraente para as lajes compostas.

Eventualmente, para situação de alta agressividade, que exigisse uma elevada espessura de revestimento que pudesse ser danificada no dobramento, este processo poderia ser adotado, não havendo restrições de ordem técnica, a não ser quanto ao comprimento possível de cada componente que, individualmente, seria colocado no banho de zinco.

4.3.3.2.2 Metalização

A metalização, ou deposição por aspersão térmica, é um processo onde basicamente tem-se a concomitante fusão e aspersão de um material (em geral metálico) sobre uma superfície (90).

Na metalização do zinco, este pode alimentar o processo na forma de fio ou em pó; a energia térmica para a fusão pode ser conseguida através da queima de um combustível ou da indução de formação de um arco elétrico (91), e o jateamento é executado com auxílio de ar comprimido (Figura 4.48).

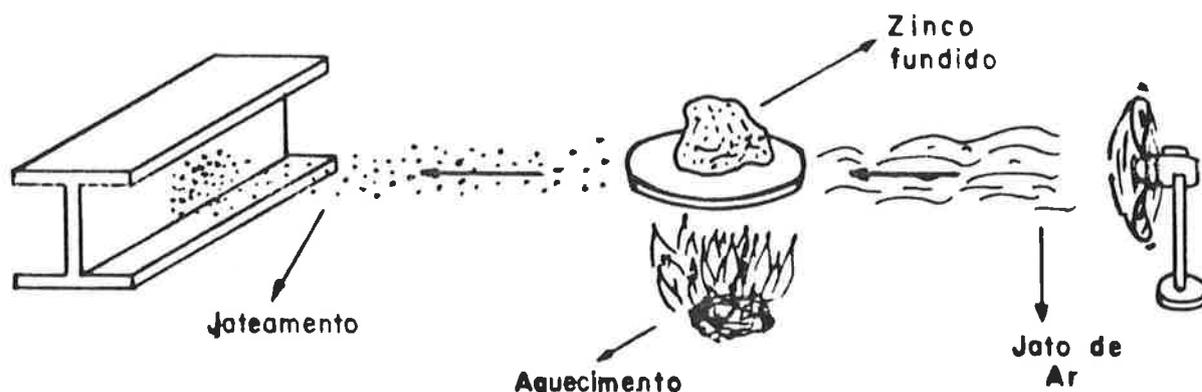


Figura 4.48 - Representação qualitativa da metalização do zinco.

As partículas fundidas assumem uma forma grosseiramente esférica no trajeto e, ao atingirem a superfície a ser revestida, achatam-se sob a forma de discos irregulares e solidificam, empilhando-se umas sobre as outras, criando um revestimento laminar (91).

A metalização do zinco surgiu, segundo Bailey (92), na década de 20, como um processo alternativo em relação à galvanização e ao uso de sistemas de pintura isoladamente, na proteção contra a corrosão do aço.

Com relação à pintura, o revestimento metalizado possui a vantagem de resistir melhor à abrasão e de propiciar a adicional proteção catódica do aço. Quanto à galvanização, permite-se o revestimento de grandes peças acabadas e consegue-se espessuras maiores de revestimento, compatíveis com requisitos de durabilidade bastante severos. Cumpre ainda ressaltar a facilidade de se proceder a reparos em componentes protegidos previamente por galvanização e pela própria metalização.

A aplicação pode ser feita através de pistolas cujo funcionamento pode diferir quanto à forma de alimentação de zinco ou à geração do calor para a fusão (93):

- zinco fornecido em fios, calor gerado por combustão de acetileno ou propano em reação com oxigênio e jateamento com auxílio de ar comprimido (Figura 4.49);

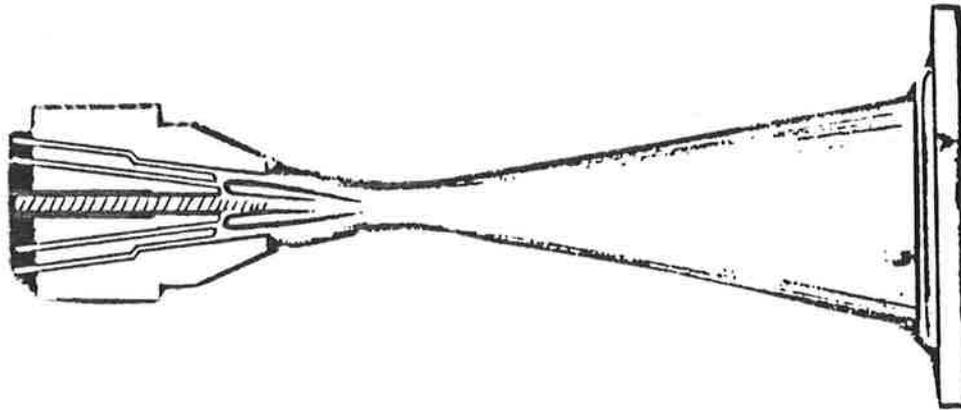


Figura 4.49 - Fios de zinco fundidos por chama.

- zinco em pó e mesma fonte de calor e jateamento que o anterior (Figura 4.50).

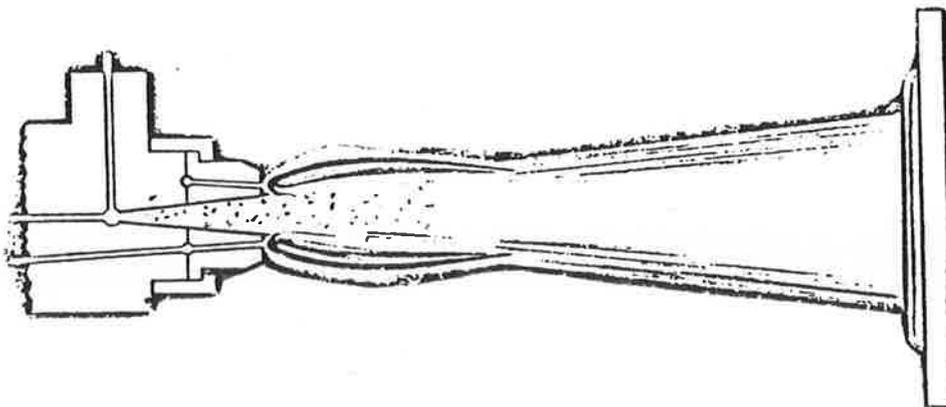


Figura 4.50 - Pó de zinco fundido por chama.

- zinco fornecido em fios, que são carregados eletricamente de forma a que, ao se aproximarem na ponta da pistola, gere-se um arco elétrico responsável pela fusão, sendo o jateamento propiciado pelo ar comprimido (Figura 4.51);

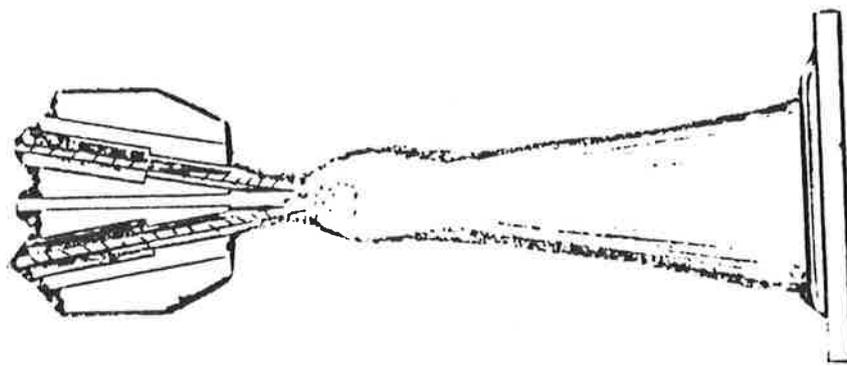


Figura 4.51 - Fios de zinco formando arco elétrico.

- zinco fornecido em pó e utilização de um plasma formador de gás como fonte de calor e propulsão das partículas, o qual é excitado por um arco elétrico de alta voltagem (Figura 4.52);

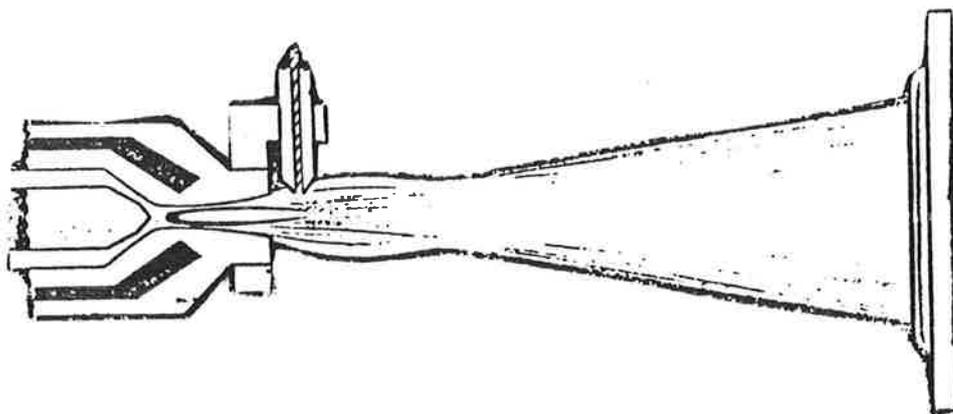


Figura 4.52 - Pó de zinco fundido por plasma.

A aderência do revestimento de zinco à superfície metálica é em boa parte propiciada por um intertravamento mecânico entre o material metalizado e a base; há também uma parcela devida a interação química entre ambos (90). Portanto, a garantia de uma boa aderência implica em um preparo de superfície meticuloso anterior à metalização, propiciando uma superfície rugosa o suficiente, bem como bastante limpa, isenta de poeiras, detritos e respingos de solda. A umidade não interfere no processo, desde que não se tenha formado ainda produtos de corrosão na superfície; as gotículas de zinco fundido, ao tocarem a superfície, volatizam qualquer umidade que possa estar presente.

O mecanismo de proteção contra a corrosão é basicamente análogo ao de um revestimento galvanizado, abrangendo a criação de uma barreira que isola o metal-base do meio corrosivo acrescida do mecanismo de proteção catódico.

Ressalta-se no entanto que, no caso de se utilizar espessuras pequenas de revestimento, a maior porosidade do zinco metalizado (5% a 10% em volume) em relação ao galvanizado, fruto da criação de poros isolados ou intercomunicáveis quando da aplicação, pode implicar num maior consumo sacrificial de zinco para o funcionamento da proteção catódica (92).

Dentro deste contexto tem-se mostrado uma solução bastante econômica (90) a utilização de zinco metalizado em pequenas espessuras recoberto por um sistema de pintura, que pode ser representado mesmo por um simples selante. A utilização dessa dupla proteção costuma proporcionar durabilidade superior à soma das durabilidades de cada uma, lembrando-se que o zinco metalizado mostra-se uma base mais propícia à ancoragem das tintas que um aço nu.

No entanto, para se conseguir essa potencial aderência da tinta ao substrato, há que se realizar a pintura logo após o jateamento do metal. O não obedecimento a esta recomendação pode implicar na formação de óxidos nos poros existentes que, recobertos pela pintura posterior, facilitarão o desprendimento da mesma.

Cabe apenas salientar que, embora não seja tratada neste capítulo, é possível a metalização do alumínio em processo análogo ao aqui descrito para o zinco.

4.3.3.2.3 Pintura com Tintas Ricas em Zinco

A proteção através das tintas ricas em zinco possui o mesmo princípio de funcionamento - proteção catódica - apresentado pela galvanização e a metalização do zinco.

As tintas ricas em zinco são aquelas em que tem-se o pó de zinco como pigmento, havendo a "necessidade de altos teores deste metal, para que haja contato elétrico entre as partículas do pigmento e o metal-base" (94), possibilitando o funcionamento da proteção. Gnecco (94) afirma ainda que "o teor mínimo recomendável de zinco na película seca é 85%" (Figura 4.53).

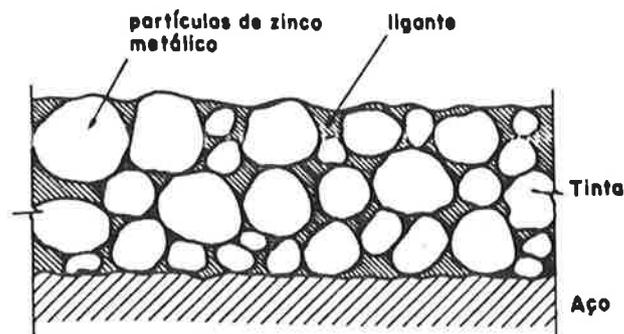


Figura 4.53 - Tinta "rica" em zinco.

Muitas vezes a proteção através da pintura com tintas ricas em zinco "é chamada de galvanização a frio" (84).

Em função da grande quantidade de pigmentos, estas tintas exigem "uma resina especial, que consiga aglomerar tantas partículas e mantenha o contato entre elas" (84); segundo Gnecco (94), as mais utilizadas têm sido resinas epoxídicas, silicatos inorgânicos e silicato de etila, com destaque para a última.

Este último autor (94) salienta a importância do preparo prévio do metal-base ao afirmar que "a eficiência desta tinta somente será efetiva se for aplicada diretamente sobre a superfície metálica perfeitamente limpa".

4.3.3.3 Tempo de Vida de um Revestimento de Zinco

A utilização de processos distintos para a confecção do revestimento de zinco origina estruturas distintas entre eles. Viu-se que, por exemplo, a galvanização dá origem a uma estrutura composta por várias camadas distintas (vide Figura 4.47), sendo que cada estrato possui um potencial de oxidação característico, conforme Tabela 4.12, enquanto a metalização origina um revestimento praticamente só de zinco.

Tabela 4.12 - Potenciais de oxidação das várias camadas de um aço galvanizado. (86)

Fase	Teor em ferro(%)	Potencial de eletrodo (volts)
Eta (rica em Zn)	0,03	- 0,55
Zeta (colunar)	5,8 a 6,2	- 0,42
Delta (palisade)	7,0 a 11,4	- 0,37
Delta (compacta)	7,0 a 11,4	- 0,32
Epsilon (próxima ao aço)	21,0 a 28,0	- 0,02
Alfa (aço)	100	- 0,44

Essas diferenças levariam à previsão de um comportamento bastante distinto quanto à corrosão. No entanto, os resultados práticos mostram que a vida útil da proteção é diretamente proporcional à massa de zinco por unidade de área (espessura do revestimento) independentemente do processo de deposição adotado (86).

Sendo assim, de posse de dados experimentais quanto à perda de massa ao longo do tempo de componentes galvanizados numa dada atmosfera, pode-se projetar a espessura de revestimento necessária para que a proteção tenha uma certa durabilidade estipulada. Na Figura 4.54 este procedimento já está consignado para algumas situações genéricas.

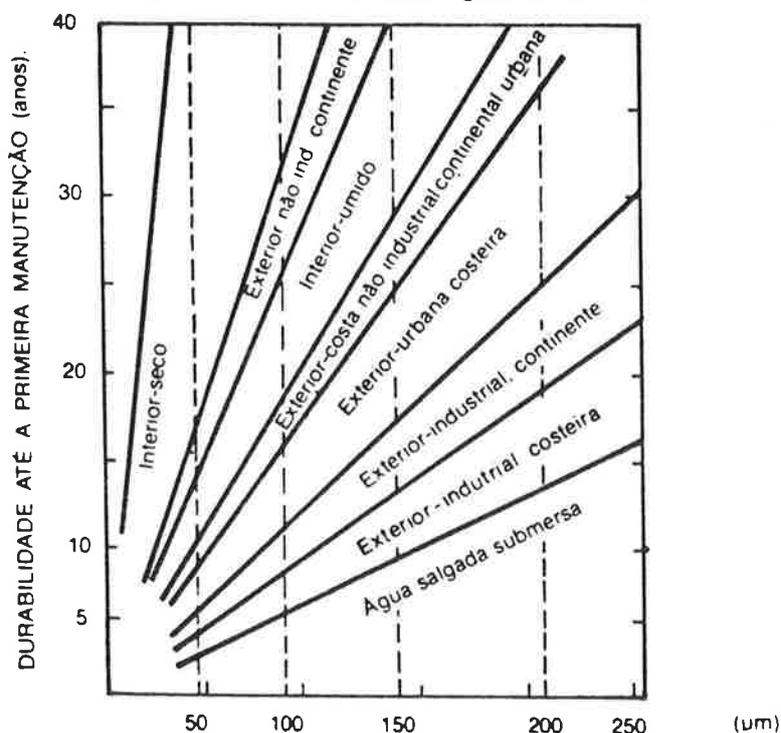


Figura 4.54 - Guia para a especificação da espessura mínima do revestimento. (86)

4.3.3.4 O Controle de Qualidade da Espessura do Revestimento

Como se viu, a vida útil do revestimento relaciona-se à sua espessura; sendo assim, mostra-se bastante relevante o controle dessa espessura por parte do usuário, no sentido de ter garantida a durabilidade prevista para o componente.

A medição da espessura pode ser feita de formas distintas (89):

- descascamento e pesagem.

Trata-se de ensaio destrutivo e demorado.

- imersão em sulfato de cobre.

Além de destrutivo fornece valores médios representativos de uma certa área.

- medição magnética.

A utilização de medidores magnéticos calibrados permite a leitura direta da espessura do revestimento.

Observe-se que uma correspondência entre a espessura e o peso da camada pode ser obtida através de um cálculo teórico onde se considera a existência de uma camada uniforme de zinco puro. Um exemplo numérico dessa correlação pode ser visto na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Correlação peso-espessura de um revestimento de zinco. (89)

Pesos (g/m ²)	1	7.07	76.3	152.6	179.4	228.9	305.2	381.5	457.8	610.3	762.9	915.5
Espessuras (µm)	0.141	1.00	11	22	25.4	32	43	54	65	86	108	130

4.3.3.5 A Utilização na Laje Composta

Dentre os processos de aplicação de revestimentos de zinco discutidos, a galvanização de laminados planos aparece como o mais indicado em função da racionalização de todo o processo. A adoção de produtos compatíveis com os esforços originados na roloformagem das chapas, bem como o controle da espessura de zinco no material recebido representam pontos relevantes para o sucesso da proteção.

4.3.4 A Proteção pela Pintura

A análise da proteção das chapas dobradas de aço pela pintura trata-se de assunto extremamente vasto, que não será abordado neste trabalho.

Este assunto abrange desde a discussão dos esquemas de pintura disponíveis, o processo da escolha do esquema mais indicado para uma dada situação (meio agressivo, tipo de substrato, etc), a especificação de um preparo de superfície adequado, bem como as técnicas de aplicação da pintura.

Neste trabalho limita-se este assunto ao levantamento da situação reinante atualmente dentre os fabricantes de telha.

4.3.4.1 Fabricantes de Telhas de Aço

As informações que se seguem foram extraídas de relatório de pesquisa (39) realizada na Escola Politécnica da USP.

Dentre os fabricantes contactados, aqueles que comercializam telhas pintadas são os seguintes: Brafer, Marko e Perkrom.

Dentre estes, ainda, pode-se distinguir apenas dois processos distintos de pintura, já que Marko e Perkrom fazem uso de chapas pintadas pela Kroma (empresa do grupo da própria Perkrom).

Tem-se de início uma diferença básica quanto à pintura, ligada ao próprio processo de fabricação das telhas: enquanto na Brafer tem-se a pintura das telhas após sua conformação, as demais perfilam o componente pré-pintado.

A descrição sucinta dos dois processos foi extraída literalmente do relatório citado (39).

4.3.4.1.1 Pintura Após Conformação

A Brafer, que utiliza aço galvanizado bem como, eventualmente, aço Cos-Ar-Cor, apresenta um processo de pintura que segue os seguintes passos:

- desengraxamento por imersão em solução alcalina;
- lavagem;
- fosfatização por imersão a quente em solução de fosfato de zinco;
- lavagem;

- passivação por imersão em solução de ácido crômico;
- secagem;
- pintura nas duas faces, eletrostática a pó, com espessura de 40 μ m, fazendo uso, normalmente, de tinta à base de resina poliéster.

4.3.4.1.2 Pintura Prévia à Conformação

Este processo de pré-pintura tem sido aplicado para aços galvanizados e não para patináveis.

A sequência simplificada é a seguinte:

- tratamento químico (com dois desengraxes e lavagens alternados);
- fosfatização ou cromatização;
- enxague;
- aplicação de primer-epoxi (5 μ m em cada face);
- cura;
- resfriamento;
- aplicação de acabamento de poliéster ou poliéster siliconizado (20 μ m em cada face);
- cura;
- resfriamento;
- aplicação de filme de polietileno para proteção de manuseio, transporte e estocagem.

5 A PROTEÇÃO CONTRA FOGO

A ocorrência de grandes incêndios tem sido registrada ao longo da história da humanidade, a partir de muitos séculos atrás. A preocupação quanto à prevenção, a proteção e o combate ao fenômeno pode ser notada também ao longo do tempo, variando de sociedade para sociedade em intensidade e critérios de abordagem. Muitas vezes a ocorrência de um grande sinistro traz como consequência grandes debates a respeito do assunto bem como, eventualmente, a adoção de critérios de abordagem mais rígidos. É fato também que, à medida em que se tem a valorização da vida humana, como consequência do próprio desenvolvimento da sociedade, as preocupações quanto à segurança contra incêndio deveriam apresentar um avanço de mesma grandeza.

Além de uma possível perda de vidas humanas, os incêndios levam a grandes perdas em termos de patrimônio. "Estimativas mostram que em vários países as perdas financeiras diretas e indiretas são da ordem de grandeza de 1% do produto nacional bruto" (95).

O incêndio é um fenômeno passível de ocorrer durante a vida útil de um edifício; os efeitos originados no seu estabelecimento, portanto, poderiam ser considerados como solicitações a que a estrutura pode estar submetida, da mesma forma que se consideram os carregamentos permanentes e acidentais. Os coeficientes de segurança das normas de dimensionamento, no entanto, não costumam abranger os "esforços" originados durante o incêndio.

O estudo do comportamento ao fogo das lajes compostas pode ser justificado por inúmeros aspectos, dentre os quais pode-se destacar:

- trata-se de um componente estrutural, cuja falência pode implicar em perda de estabilidade de parte da estrutura do edifício;
- localiza-se na região superior dos ambientes, sujeita às mais altas temperaturas desenvolvidas durante o incêndio;
- o aço, material cuja resistência mecânica é bastante sensível à elevação da temperatura, encontra-se na superfície inferior do componente, não possuindo, a princípio, a natural proteção dada pelo recobrimento de concreto inerente às lajes de concreto armado.

Enfim, o conhecimento do comportamento das lajes compostas durante um incêndio é essencial para uma utilização segura das mesmas; com este objetivo, discorre-se ao longo deste capítulo sobre:

- o entendimento do fenômeno do incêndio;
- as exigências de resistência ao fogo para as lajes;
- recomendações para melhorar o desempenho das lajes compostas frente ao fogo;
- a utilização de materiais de proteção existentes no mercado nacional.

5.1 O FENÔMENO DO INCÊNDIO

A ocorrência de um incêndio envolve uma série de eventos, que foram sendo conhecidos através da observação de sinistros ocorridos ao longo do tempo, bem como de pesquisas realizadas em torno do assunto. Assim é que, num incêndio iniciado no 33º andar de um edifício em Manhattan em 1970, a elevação da pressão no hall de elevadores, devido à concentração de produtos gasosos originados na combustão, foi suficiente para acionar o botão de chamada do elevador, o que o fez parar no piso incendiado, levando à morte duas pessoas que nele se encontravam (96).

Faz parte inclusive da instrução de bombeiros a orientação para se evitar a abertura súbita de portas ligadas a ambientes em chamas, no sentido de se prevenir a ocorrência de uma inflamação repentina nas imediações desta.

É fato conhecido também que incêndios ocorridos em teatros (97) ou em sub-solos enterrados são muitas vezes mais danosos à edificação que os ocorridos em edifícios de escritório com arquitetura moderna.

Enfim, existe uma série de características associadas à ocorrência do fenômeno, umas mais outras menos conhecidas, que devem ser estudadas para tornar os edifícios - e as lajes compostas em particular - mais seguros. O conhecimento da duração bem como da severidade associadas a situações diferentes auxilia no estabelecimento de exigências compatíveis de resistência ao fogo em cada caso.

Ressalte-se ainda a existência, em outros países, de legislação relativa à proteção contra fogo bastante consistente, fundamentada em inúmeras pesquisas e discussões, e respeitada de uma maneira geral. No Brasil, o panorama ainda é bastante diferente: não existe uma norma que estabeleça exigências de resistência ao fogo para os edifícios de aço e os códigos de construção apresentam exigências que são muitas vezes ignoradas, quer pelo descrédito que se lhes atribui, quer pela inexequabilidade das mesmas.

Enfim, se o conhecimento do fenômeno é importante para qualquer profissional que pretenda chegar o mais próximo de soluções ao mesmo tempo eficazes e econômicas quanto à segurança contra incêndio, no caso do nosso país esta discussão torna-se mais relevante no sentido de se pleitear um tratamento mais adequado, seja por parte de normas técnicas que vem sendo desenvolvidas (98,99) seja por parte das legislações municipais, estaduais ou federais relativas ao assunto.

5.1.1 Uma Visão Analítica

O incêndio caracteriza-se pela combustão dos materiais, a qual é fruto do estabelecimento de uma série de reações de oxidação-redução, que ocorrem sob a forma de uma cadeia, liberando grandes quantidades de calor e luz (100). Rosso (101) chama de incêndio ao fenômeno que se estabelece em proporções que estão além do nosso controle.

A associação direta entre o incêndio e a combustão dos materiais nos leva a um estudo mais minucioso deste tipo de reação química. Landi (102) afirma tratar-se de um fenômeno extraordinariamente complexo, apresentando a formação de um grande número de substâncias intermediárias, sendo algumas de curta duração; "mesmo a combustão de uma substância simples como o metano ainda hoje não é perfeitamente conhecida".

Com a consciência de toda essa complexidade cabe, porém, a discussão de alguns aspectos fundamentais que regem a ocorrência do fenômeno, para melhor entendê-lo e poder mesmo atuar sobre este.

A combustão pode simplificada ser considerada como um fenômeno de oxidação-redução onde o agente oxidante, também denominado comburente, é na maioria das vezes o oxigênio do ar; o combustível, isto é, a substância que libera o calor, trata-se do agente redutor do processo, ou ainda, da substância que é oxidada na reação. A reação produz liberação de calor e chamas, além de produtos gasosos e resíduos tais como fuligem (Figura 5.1).

Considera-se (103) que a combustão desenvolve-se até que:

- " - o material combustível seja consumido ou removido;
- a concentração do agente oxidante seja reduzida a valores inferiores aos demandados pelo processo;
- o material combustível seja resfriado abaixo de sua temperatura de ignição;
- as chamas sejam quimicamente inibidas."

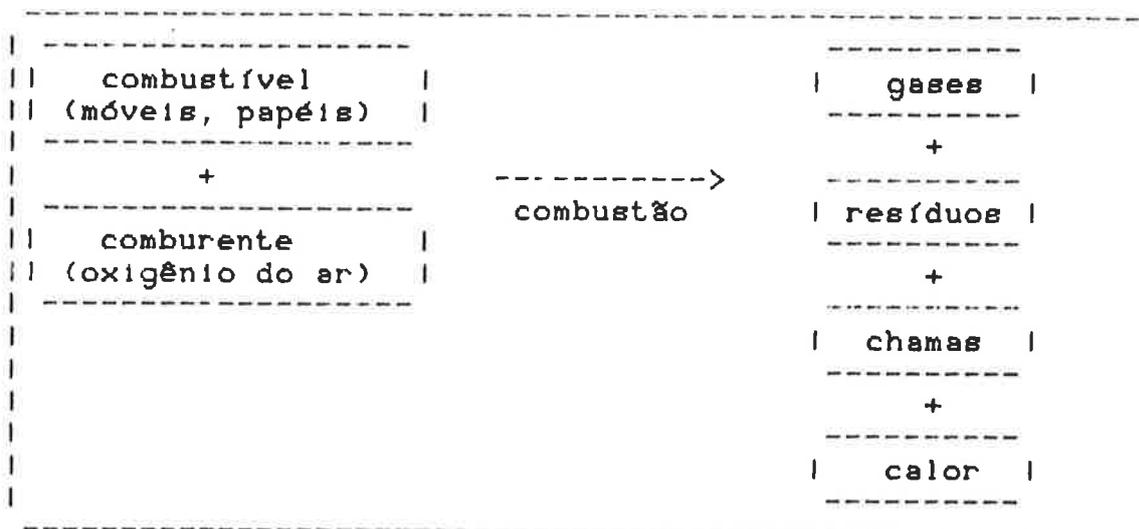


Figura 5.1 - Visão simplificada da combustão dos materiais durante um incêndio.

Da discussão acima infere-se as condições necessárias para o desenvolvimento pleno das reações em cadeia que caracterizam a combustão; devem estar presentes, e em quantidades adequadas, os seguintes quatro fatores: combustível, comburente, calor e chamas (Figura 5.2).

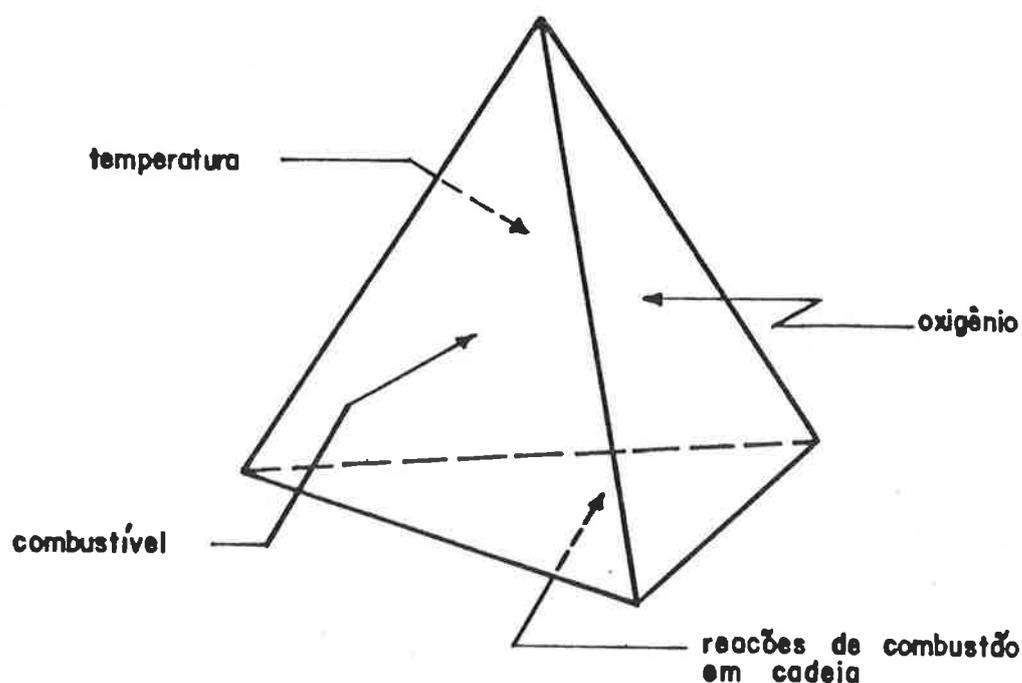


Figura 5.2 - Fatores essenciais para o estabelecimento e continuidade da combustão.

De um modo geral as reações de combustão se dão na fase gasosa (100). Se o combustível é líquido ele evapora e a reação ocorre entre o vapor do líquido e o oxigênio. Em grande parte dos casos dos combustíveis sólidos, a parcela mais importante da combustão é a que se relaciona à queima dos gases (combustão flamejante) que se originaram da destilação dos constituintes voláteis do material sólido (pirólise); a parcela em geral menos significativa é a que se relaciona à combustão do sólido restante propriamente dito, como por exemplo o carvão, onde a reação se dá na interface sólido-gás (combustão ardente, ou sem chamas) (104).

Para que as chamas possam se propagar efetivamente numa mistura combustível-comburente, existe a exigência de que a composição apresente-se dentro de certos limites, denominados limites de inflamabilidade. Fora desses limites a chama iniciada num ponto se propaga por curta distância e se extingue.

Além da restrição quanto à composição, tem-se exigências quanto à temperatura do combustível para que a chama não se extinga. Define-se ponto de fulgor à mínima temperatura em que os vapores do combustível entram em combustão na presença de uma chama sendo que, no entanto, a combustão cessa se extinguir-se esta chama inicial. Define-se, finalmente, ponto de ignição à mínima temperatura para que, nas mesmas condições, os vapores entrem em combustão contínua.

O fenômeno da combustão pode ser vislumbrado, de uma maneira mais abrangente, através da Figura 5.3. O aparecimento de uma chama inicial, provocada por exemplo por um curto-circuito, principia a destilação do combustível sólido gerando gases que, ao se misturarem com o oxigênio numa proporção dentro dos limites de inflamabilidade, criam uma mistura inflamável, que vai se aquecendo até atingir o ponto de ignição. Neste instante a chama inicial pode provocar a combustão da mistura, gerando reações exotérmicas que retro-alimentam o processo.

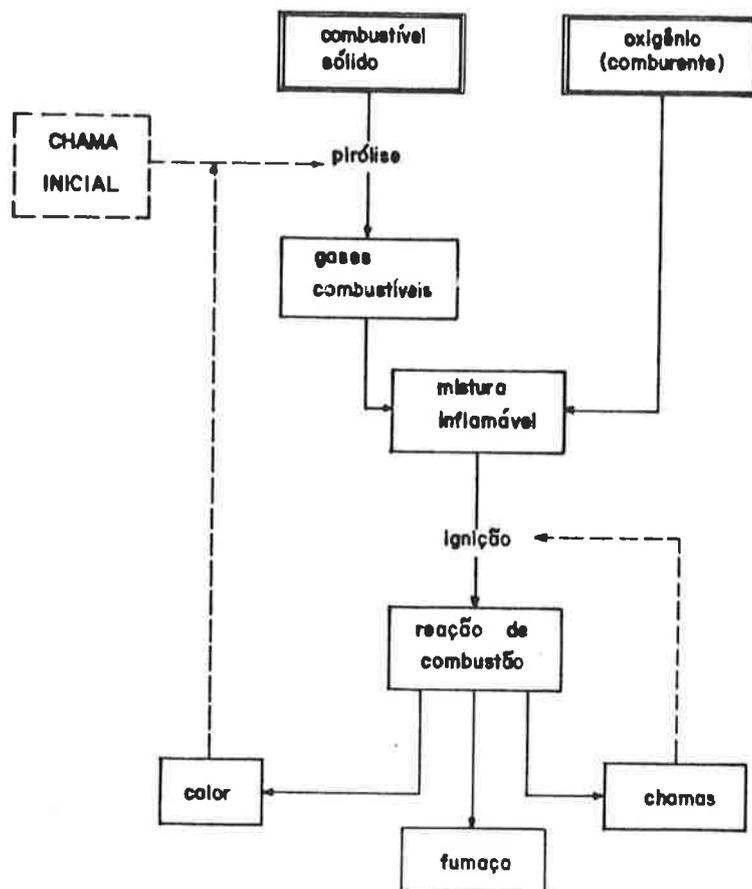


Figura 5.3 - O fenômeno da combustão.

5.1.2 Caracterização da Ocorrência

O incêndio no interior de um recinto de uma edificação desenvolve-se, em linhas gerais, conforme descrito a seguir. Existindo uma fonte inicial de calor e chama, os materiais combustíveis existentes no ambiente vão sendo paulatinamente aquecidos, com a conseqüente ocorrência da pirólise dos mesmos, e as chamas vão se desenvolvendo de forma bastante gradual. Ocorre uma contínua concentração de gases inflamáveis aquecidos, que só não originam uma combustão de maiores proporções em função da deficiência de oxigênio que gere uma proporção dentro dos limites de flamabilidade.

O calor gerado, no entanto, eleva a temperatura ambiente a níveis suficientes para, num dado instante, romperem-se os vidros das janelas, que dificultavam até este momento um acesso de ar mais significativo. Este súbito acesso de oxigênio deflagra uma combustão generalizada, que pode ser acompanhada inclusive por explosões; trata-se do denominado "flash-over".

Os combustíveis passam então a ser queimados a velocidades bem mais altas, gerando grande liberação de energia e provocando uma elevação acentuada da temperatura ambiente.

Consumida parcela significativa dos combustíveis disponíveis, alcança-se um estágio em que o calor gerado por novas combustões não mais supera a energia perdida para o meio externo ao ambiente em análise; isto gera um decaimento da temperatura.

Lie (95) descreve o desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo para um incêndio experimental, conforme a Figura 5.4, na qual ilustra-se as três fases em que se costuma dividir a ocorrência:

- 1ª) fase inicial de elevação de temperatura;
- 2ª) fase de propagação generalizada;
- 3ª) fase de redução da temperatura e extinção.

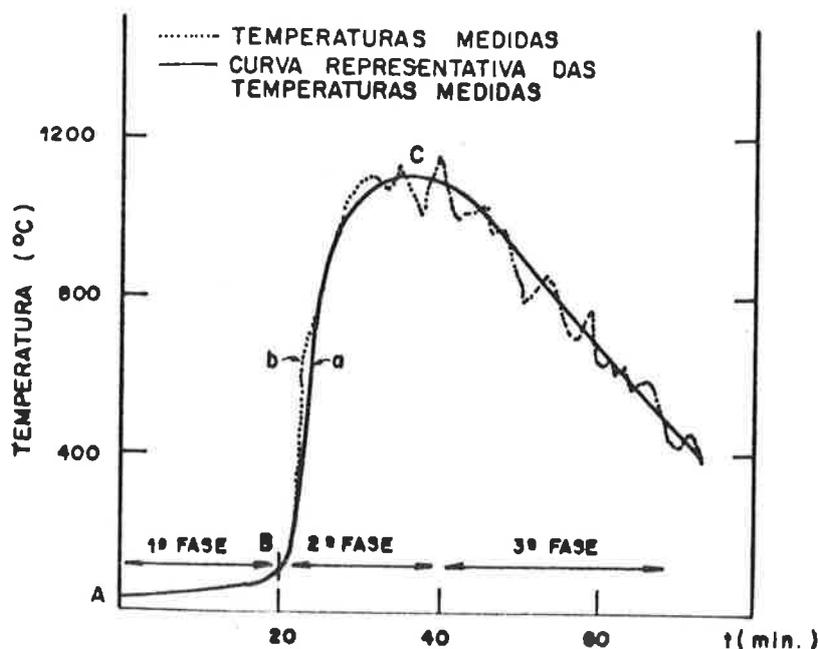


Figura 5.4 - Desenvolvimento da temperatura durante um incêndio.

O limite entre a 1ª e 2ª fases é caracterizado pela ocorrência do "flash-over", enquanto considera-se que o início da queda da temperatura interna separa a 2ª da 3ª fases.

A fase de propagação generalizada é a de maior importância para a caracterização da ocorrência, já que corresponde à maior parcela de energia gerada e transmitida ao "envelope" do ambiente, e mesmo costuma ser aquela que serve de referência para a estimativa da duração do incêndio como será visto adiante. Pode-se considerar que, nesta etapa, alcança-se a maior velocidade de suprimento de oxigênio para a combustão.

Esta capacidade potencial de suprimento de comburente ao ambiente tem influência marcante nas características do incêndio que se estabelece.

Considerando-se que, para a queima de 1 kg de madeira são necessários 5 m³ de ar para fornecer o oxigênio necessário, tem-se que, para um compartimento com dimensões em planta de 7 m por 10 m e pé-direito de 3 m, com quantidade de materiais combustíveis equivalente a 40 kg de madeira por m² de piso, ter-se-ia a necessidade de 14.000 m³ de ar. Isto corresponde a quase 70 vezes o volume do próprio ambiente. Fica claro, portanto, a alta demanda de oxigênio exigida pelo processo.

Assim é que os incêndios podem ser classificados em:

- controlados pela ventilação;
- controlados pelo combustível.

No primeiro caso tem-se a situação em que, pela existência de aberturas insuficientes para um suprimento de ar em excesso, é a velocidade de acesso deste que comanda a própria velocidade da combustão; no segundo caso, a alta disponibilidade de ar faz com que o fator limitante da duração do incêndio passe a ser a quantidade de combustível (ou a superfície disponível de combustível).

A quantidade total de energia liberada, bem como a própria definição de um suprimento mínimo de ar para que não falte oxigênio à combustão, estão intimamente associados ao tipo e quantidade de combustíveis disponíveis no ambiente.

Sabe-se que, na combustão de mesmas quantidades de dois materiais distintos A e B, a energia total liberada pode ser bastante diferente, em função das diferenças dos valores do poder calorífico de cada um.

Assim é que, para o levantamento do potencial calorífico de um ambiente, isto é, da energia passível de ser liberada por combustão a ele associada, adota-se a madeira (poder calorífico de 4,5 Mcal/kg) como material de referência.

Se no ambiente anteriormente citado existirem 900 kg de um material A com poder calorífico de 9,0 Mcal/kg e 750 kg de um material B de 6,0 Mcal/kg, ter-se-á o equivalente a 2800 kg de madeira.

O potencial calorífico dos ambientes é comumente expresso em relação à unidade de área. Para o caso anterior, onde tem-se um piso de 70 m², o potencial calorífico seria portanto de 40 kg de madeira/m².

5.1.3 Duração e Severidade

Há muito se discute a respeito dos danos potenciais que um incêndio pode causar aos componentes estruturais de um edifício, discussão que se insere no contexto do denominado estudo da severidade do mesmo. A duração do fenômeno foi apontada durante muito tempo como quantificador único da severidade.

Procura-se, a seguir, discutir as idéias que orientam a definição de severidade, bem como ilustrar a forma pela qual se pode estimar a duração equivalente para um incêndio.

Apresenta-se ainda alguns levantamentos de potenciais caloríficos com o intuito de proceder a uma verificação quantitativa desta duração prevista.

5.1.3.1 Incêndio Normalizado

A probabilidade de ocorrência de dois incêndios exatamente iguais é nula em face dos inúmeros fatores que podem intervir no processo. No entanto, assim como ocorre em várias outras áreas da tecnologia, surge a necessidade de uma modelagem do fenômeno.

Um dos aspectos desta modelagem do incêndio é a criação de uma curva padronizada para a representação do desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo.

A ISO (Internacional Standard Organization), da qual o Brasil é membro, emitiu a especificação ISO-834-4 (105), pela qual se convencionou a curva ilustrada na Figura 5.5 como curva normalizada. Nosso país, através da NBR-5628/80 (106), faz uso desta mesma curva para a determinação da resistência ao fogo dos componentes construtivos estruturais.

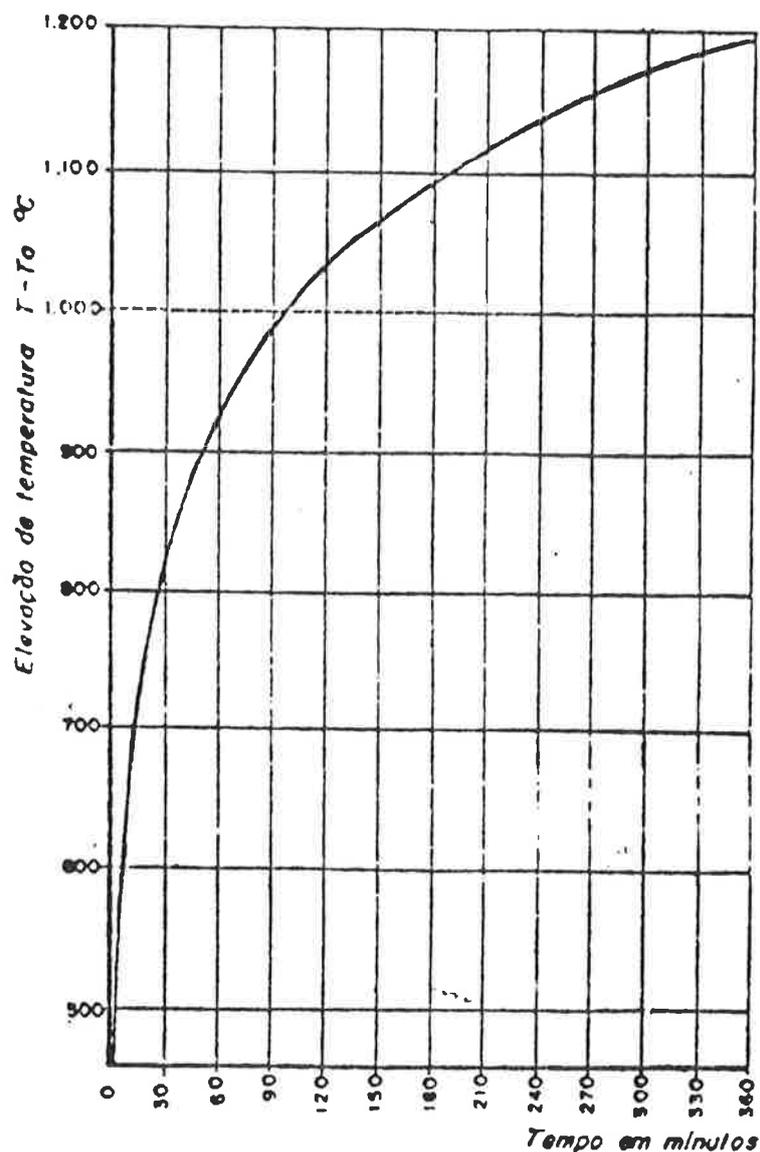
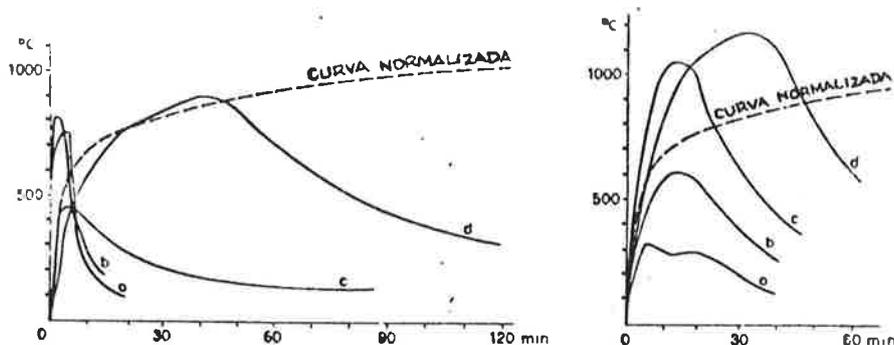


Figura 5.5 - Curva normalizada do incêndio. (106)

Segundo Malhotra (107), a maior parte dos países já possuía normalização própria com este mesmo objetivo, tendo porém paulatinamente adotado a curva da ISO durante os últimos anos.

É necessário ressaltar que esta curva não equivale ao incêndio real. Ela "nasceu a partir de um incêndio que representasse condições bastante severas, a fim de que os resultados refletissem o comportamento dos materiais perante situações graves" (100); um incêndio real pode diferir bastante da mesma, possuindo desenvolvimento bem como valores alcançados de temperatura bastante diversos (Figura 5.6).



- | | |
|--|--|
| a) óleo combustível em recipiente aberto (30 Mcal/m ²) | a) 7,5 kg/m ² (30Mcal/m ²) |
| b) revestimento com aglomerado prensado (30 Mcal/m ²) | b) 15 kg/m ² (60 Mcal/m ²) |
| c) papel (200 Mcal/m ²) | c) 30 kg/m ² (120 Mcal/m ²) |
| d) tocos de madeira (200 Mcal/m ²) | d) 60 kg/m ² (240 Mcal/m ²) |

Figura 5.6 - Desenvolvimento das temperaturas ao longo do tempo em incêndios reais: (1) materiais distintos; (2) madeira em diferentes quantidades. (108)

O objetivo da padronização é fornecer um modelo comum para a comparação de resistência ao fogo de componentes existentes, servindo ainda para o desenvolvimento de novos componentes bem como para a própria estimativa de resistência ao fogo dos componentes em geral conforme se indicará posteriormente.

5.1.3.2 A Severidade de um Incêndio

Apesar de Malhotra (107) destacar que "a severidade não é precisamente definida em qualquer norma ou código", entender-se-á o estudo da severidade como a estimativa do potencial destrutivo de um incêndio. O autor citado a define ainda como "uma medição conjunta das condições de aquecimento e seu efeito sobre a estrutura quando da exposição a um incêndio". Desta definição conclui-se que não basta a simples medição das temperaturas alcançadas ou da duração do fenômeno; necessita-se de uma análise sistêmica da ocorrência.

Os primeiros estudiosos do assunto, ao analisar uma ocorrência particular, acreditavam poder generalizar todas as conclusões obtidas. Ingberg, na década de 1920, foi o primeiro pesquisador que distinguiu e quantificou a influência de alguns fatores quanto ao desenvolvimento do incêndio (107).

Dentro do espírito da modelagem do fenômeno, as correlações são feitas a partir das três situações descritas na Figura 5.7.

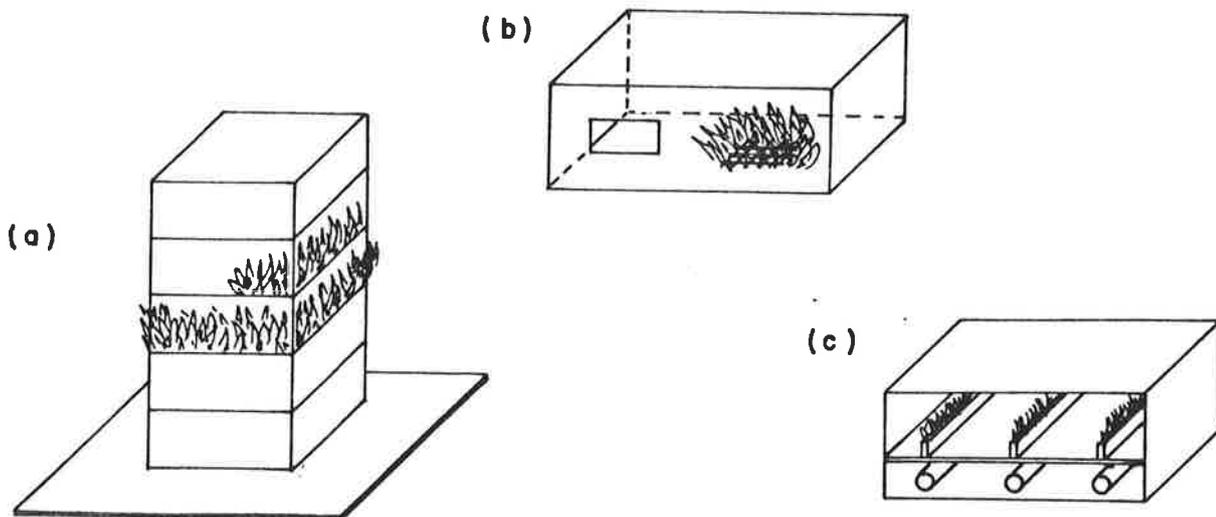


Figura 5.7 - A modelagem do fenômeno do incêndio: a) incêndio real; b) incêndio simulado dentro de compartimento; c) forno com queimadores (incêndio normalizado).

O objetivo é o de se conhecer a severidade associada a um possível incêndio que se estabeleça, numa situação real, onde os vários parâmetros que influenciam o fenômeno podem estar presentes de uma maneira aleatória, como por exemplo a quantidade, tipo e localização do material combustível, a tipologia, dimensões e posição das aberturas, o ponto inicial de deflagração do sinistro, etc.

Um estágio dos estudos experimentais relaciona-se à simulação de incêndio em compartimentos sob condições controladas: simula-se o carregamento combustível, com madeiras empilhadas por exemplo, regula-se a abertura dos vãos que dão acesso ao oxigênio, etc.

O outro estágio está associado à existência de um forno que possui geradores de calor (por exemplo maçaricos), onde o desenvolvimento da temperatura é controlado, podendo ser estabelecido segundo a curva-padrão de incêndio anteriormente citada.

Portanto, as situações representadas nas Figuras 5.7- a, b e c estão em ordem crescente de "modelagem", isto é, em ordem crescente de controle dos parâmetros envolvidos e mesmo de singularização dos mesmos. Os estudos do incêndio podem ser feitos a partir de uma destas situações, devendo-se tomar um extremo cuidado em analisar os dados finais obtidos, levando-se em conta o grau de modelagem associado.

O estudo da severidade esteve durante muito tempo associado à determinação da duração do incêndio. Acreditava-se que o fenômeno seria tanto mais danoso quanto maior fosse sua duração.

Quanto à estimativa da duração dos incêndios, se as primeiras determinações foram fruto da observação de ocorrências reais aleatórias, a abordagem tecnológica caminhou no sentido da execução de incêndios simulados, procedendo-se à quantificação dos vários parâmetros relevantes, chegando a uma modelagem matemática aferida com parâmetros experimentais.

A submissão de componentes a um aquecimento segundo a curva normalizada de incêndio é um procedimento que permite compará-los quanto ao desempenho com relação à elevação da temperatura. No entanto, se um incêndio real ou simulado cessa com o esgotamento do material combustível, há que se definir durante quanto tempo deve-se submeter um componente ao aquecimento normalizado para representar diferentes incêndios.

Ingberg, considerando que a solicitação a que os materiais ficam expostos é função da temperatura e do tempo de exposição, sugeriu que se "procurasse uma equivalência entre as áreas abaixo das curvas tempo-temperatura representativas do incêndio real e do normalizado" (100), conforme se ilustra na Figura 5.8.

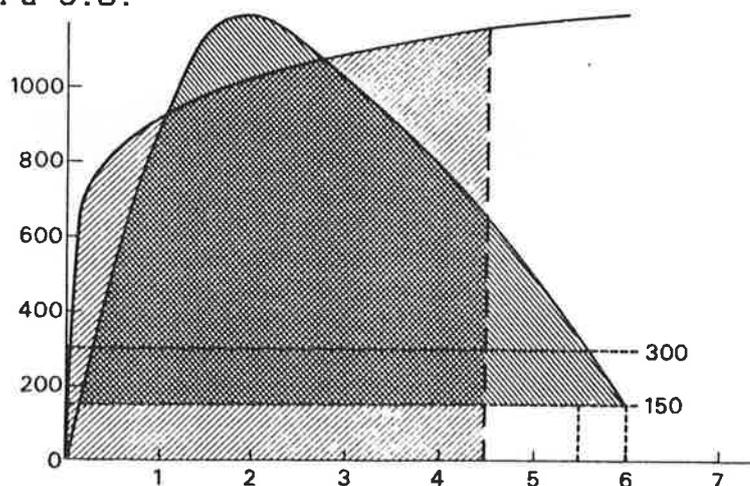


Figura 5.8 - O conceito de severidade associado à igualdade de áreas sob a curva tempo-temperatura do incêndio.

Note-se a existência de uma linha inferior para cômputo das áreas, denominada linha de base, cuja adoção nasce do fato de se aceitar que os materiais de construção usuais não sofrem alterações de natureza física e química até esta temperatura (100). Enquanto Malhotra (107) indica as temperaturas de 300°C e 150°C, Landi (100) cita que já se propôs a adoção de 500°C, mas que "a nível do conhecimento tecnológico atual tem sido preferível aceitar os 300°C mesmo".

A consideração da duração como parâmetro único para a estimativa da severidade do incêndio mostra-se insuficiente; a energia total liberada deve ser considerada no que tange ao potencial danoso da mesma.

O levantamento do potencial calorífico de um ambiente também não configura por si só a severidade associada a um possível sinistro no mesmo. Lie (95) cita o caso de dois incêndios ocorridos em ambientes com mesmo potencial calorífico (50 kg de madeira por m² de piso) em que a temperatura alcançou aos 20 minutos e aos 40 minutos respectivamente 800°C e 880°C no primeiro e 1100°C e 1300°C no segundo, o que pode configurar severidades distintas.

O próprio conceito desenvolvido por Ingberg é passível de sérias críticas; por exemplo, a submissão de uma estrutura de aço a temperaturas da ordem de 800°C por uma hora provavelmente gerará sua ruína, enquanto se o aquecimento se mantiver nos 400°C por duas horas pode-se ter uma situação bastante mais favorável.

Os resultados experimentais de Ingberg foram obtidos de incêndios simulados onde "as aberturas foram previstas de forma a não faltar oxigênio para a combustão" (100), não sendo portanto considerado o efeito da ventilação na duração do fenômeno. Com isto, "nos primeiros estudos considerou-se que a severidade do incêndio fosse relacionada unicamente ao conteúdo combustível do edifício", já que a cada potencial calorífico associava-se uma duração única para o fenômeno.

Na Figura 5.9 (97), no entanto, fica clara a importância da ventilação quanto à temperatura média que pode ser alcançada pelos gases do ambiente durante a segunda fase do incêndio.

Ao analisar teoricamente o desenvolvimento de temperaturas ao longo de um incêndio controlado pela ventilação, Lie (95) leva em conta a ventilação - através do fator $A\sqrt{H}$ - a área das paredes e pisos do contorno (A_p) e as próprias características térmicas deste contorno (Figura 5.10).

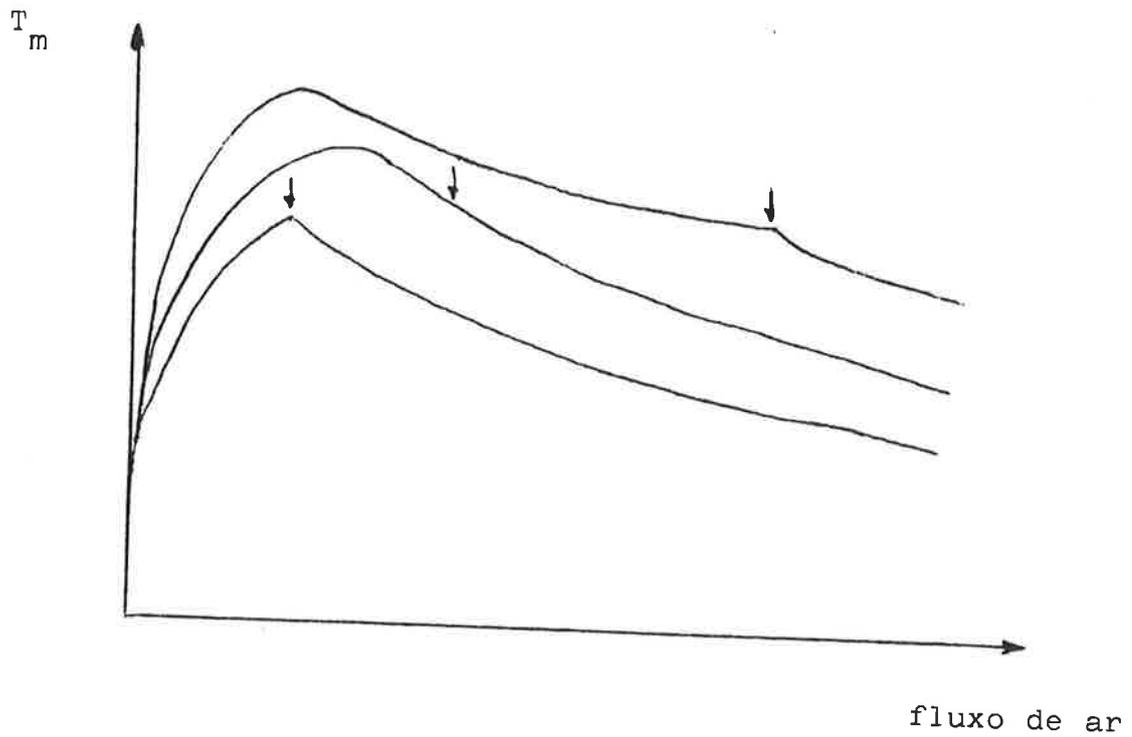


Figura 5.9 - Relação típica entre a temperatura média do incêndio e a ventilação.

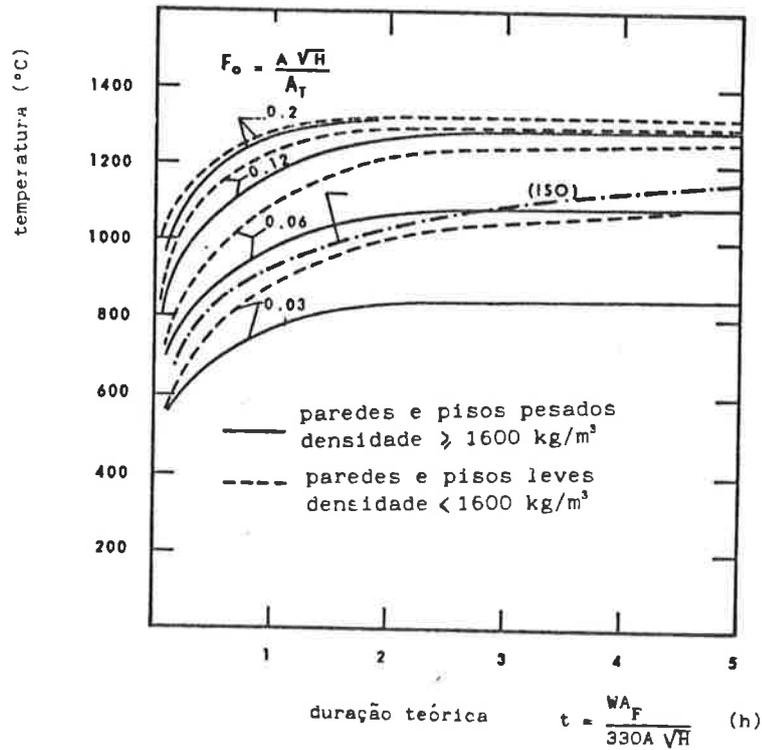


Figura 5.10 - O desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo para incêndios controlados pela ventilação.

Malhotra (107) indica que as investigações experimentais têm identificado três principais parâmetros que influenciam a severidade de um incêndio em um compartimento:

- material combustível presente (quantidade, tipo, distribuição);
- ventilação (área, altura, localização);
- características do compartimento (dimensões, forma, características térmicas).

Harmathy (99) sumariza que a severidade pode ser julgada através dos seguintes parâmetros:

- duração;
- temperatura média dos gases no compartimento durante a segunda fase do incêndio;
- fluxo efetivo de calor para dentro dos componentes de contorno do ambiente.

Sugere ainda que a idéia intuitiva de que a maior severidade ocorreria para um fluxo de ar limite entre a condição de controle pela ventilação e pelo combustível, não se verifica exatamente. Nesta condição ter-se-ia o fornecimento mínimo de oxigênio para propiciar a máxima velocidade de queima; no entanto, as chamas que ocorrem são muito grandes nesta condição, o que propicia grandes perdas de calor por irradiação para o meio externo. "Por esta razão as máximas temperaturas geralmente ocorrem para algum fluxo de ar intermediário dentro da região de incêndio controlado pela ventilação".

Harmathy chama a atenção para o fato de que a severidade não é suficientemente definida através da duração e das temperaturas alcançadas; exemplifica com o caso de incêndios em dois compartimentos com mesmas características geométricas, de ventilação e de conteúdo combustível, com a única diferença de que um deles é revestido com material isolante térmico mais efetivo que o outro. Neste primeiro, apesar de as temperaturas alcançadas serem maiores, menor quantidade de energia deve alcançar os componentes estruturais revestidos. Assim, no que tange aos revestimentos este primeiro caso é o mais crítico, enquanto para os componentes estruturais a maior severidade se associa ao segundo caso.

5.1.3.3 A Duração do Incêndio

Da discussão precedente conclui-se que uma análise relevante da severidade só pode ser conseguida através de um estudo sistêmico da questão.

Landi (100) concorda com a relevância dos parâmetros citados por Harmathy quanto à estimativa da severidade; no entanto afirma que "uma grandeza que reunisse as três ações, devidamente ponderadas, não foi ainda proposta".

A severidade tem sido tradicionalmente associada à estimativa da duração do incêndio. Apesar dos vários parâmetros que a influenciam, tem-se considerado, com os devidos cuidados, que conhecendo-se o período de tempo demandado pela ocorrência tem-se fortes indicações quanto à necessidade de proteção dos componentes construtivos.

As estimativas de duração têm sido desenvolvidas tanto a nível de se prever o período de tempo do fenómeno real (D), através de dados levantados em incêndios simulados, quanto a nível de se determinar uma duração equivalente ($D_{equivalente}$) para o incêndio; submetido ao incêndio normalizado por este último período citado, um componente seria "solicitado" equivalentemente ao que ocorreria na situação real associada.

Várias equações, portanto, foram definidas, sob condições e hipóteses muitas vezes distintas, algumas das quais serão descritas a seguir.

Ingberg, com os dados levantados em seus incêndios simulados, "esboçou uma tentativa de correlacionar as severidades dos experimentos com aquelas verificadas para elementos construtivos similares submetidos ao aquecimento em incêndios" (107). Rosso (101) cita a correlação creditada a Ingberg como sendo:

$$D = 1,3 W \quad (5.1)$$

onde:

D = duração do incêndio (min);

W = potencial calorífico, expresso em massa equivalente de madeira por unidade de área (kg/m^2).

Robertson e Gross, analisando o trabalho de Ingberg e adotando o conceito de igualdade de severidade associada à igualdade de áreas sob a curva temperatura-tempo, chegaram à correlação entre potencial calorífico de ambientes e a duração de incêndios normalizados para representá-los, conforme se indica na Figura 5.11. Nesta verifica-se que a adoção da linha de base como sendo 150°C ou 300°C é menos significativo que a própria variação entre os testes (107).

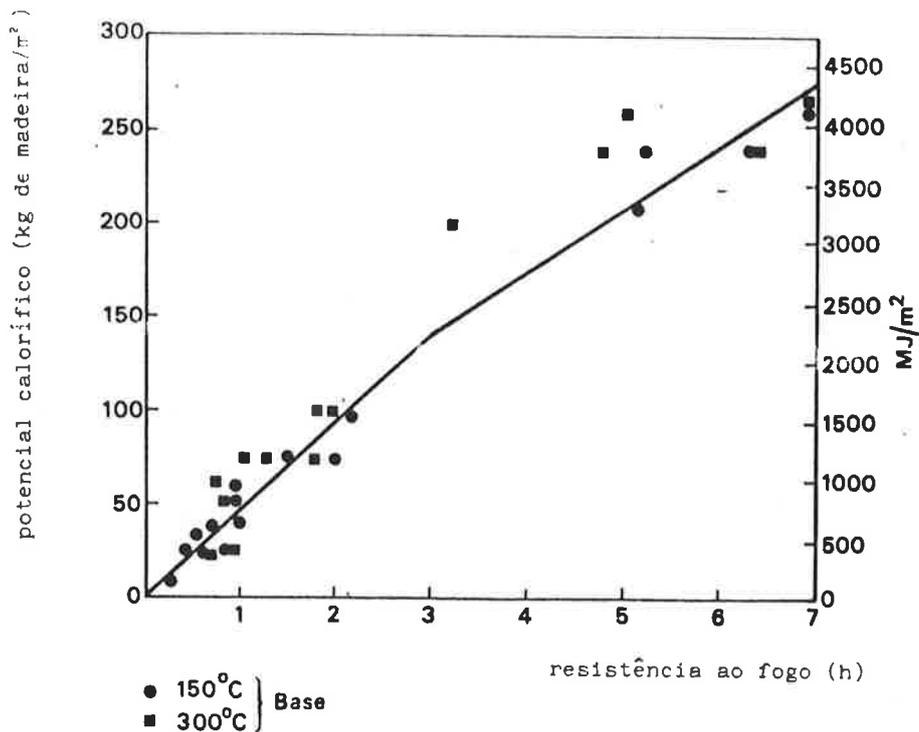


Figura 5.11 - Relação entre o potencial calorífico e as exigências quanto ao tempo de resistência ao fogo em incêndios normalizados.

Em estudos realizados por Kawagoe e Sekine e por Odeen a trajetória da temperatura foi estimada pela análise do balanço térmico do ambiente, assumindo temperatura uniforme para os gases do ambiente e transmissão de calor unidimensional e uniforme pelos contornos (95). A velocidade de combustão dos materiais, segundo Kawagoe e Sekine, para incêndios controlados pela ventilação é dada por (102):

$$R = 5,5 \cdot A_v \cdot \sqrt{H} \quad (5.2)$$

onde:

R = velocidade de combustão dos materiais (kg/min);
 A_v = área total das aberturas de ventilação (m²);
H = altura média destas aberturas de ventilação (m);

Da expressão acima conclui-se que a duração do incêndio pode ser determinada por (109):

$$D = \frac{W \cdot A_p}{5,5 \cdot A_v \cdot \sqrt{H}} \quad (\text{min}) \quad (5.3)$$

onde:

A_p = área do piso do ambiente (m^2).

Helseden, para incêndios controlados pela ventilação, mostra que (107):

$$R = 0,1 \cdot A_v \cdot H_v \quad (\text{kg/seg}) \quad (5.4)$$

levando à seguinte duração do incêndio (109):

$$D = \frac{W \cdot A_p}{6 A_v \cdot H_v} \quad (\text{kg/min}) \quad (5.5)$$

Harmathy (97) deduz expressões tanto para incêndios controlados pela ventilação quanto pelo combustível; mais que isto, fornece uma expressão para delimitar a ocorrência de uma ou outra situação.

Quanto à classificação do incêndio, esta é função do fluxo de ar em relação aos combustíveis disponíveis. Para mobiliário convencional de madeira o limite entre os dois regimes é estabelecido pela expressão:

$$\frac{U_m}{G} = 18,2 \quad (5.6)$$

onde:

U_m = fluxo de ar em massa (kg/h) sendo estimado por:

$$U_m = 11,8 A_v \cdot \sqrt{H_v} \quad (5.7)$$

Valores superiores a 18,2 representam situações de controle pelo combustível e menores que 18,2, controle pela ventilação. Indica-se abaixo o tempo de duração previsto para o primeiro e o segundo casos respectivamente:

$$D = 19 \text{ min} \quad (5.8)$$

e

$$D = 0,22 \frac{W}{\frac{A_v}{A_p} \cdot \sqrt{H_v}} \quad (5.9)$$

Law, comparando o desenvolvimento de temperatura de perfis de aço presentes em incêndios simulados com o verificado sob o aquecimento normalizado chegou à seguinte expressão para a duração equivalente do incêndio:

$$D_{\text{equil.}} = \frac{G}{A_v \cdot (A_t - A_v)} \quad (\text{min}) \quad (5.10)$$

onde:

A_t = área superficial total do compartimento, incluindo paredes, piso e teto (m^2).

Na Tabela 5.1 encontram-se listadas as durações de incêndios determinadas através das equações (1), (2), (3), (4) e (5), para potenciais caloríficos variando de 10 a 100 kg de madeira por m^2 de piso. Observe-se que as equações (1) e (4) referem-se a incêndios controlados pelo combustível, tendo sido aplicadas neste exemplo ao edifício cuja planta esquematizada encontra-se na Figura 5.12-a; as demais equações referem-se a incêndios controlados pela ventilação, tendo sido aplicadas aos dois casos de edifícios, cujas plantas esquematizadas podem ser vistas na Figura 5.12-b, representativos de duas condições distintas de ventilação.

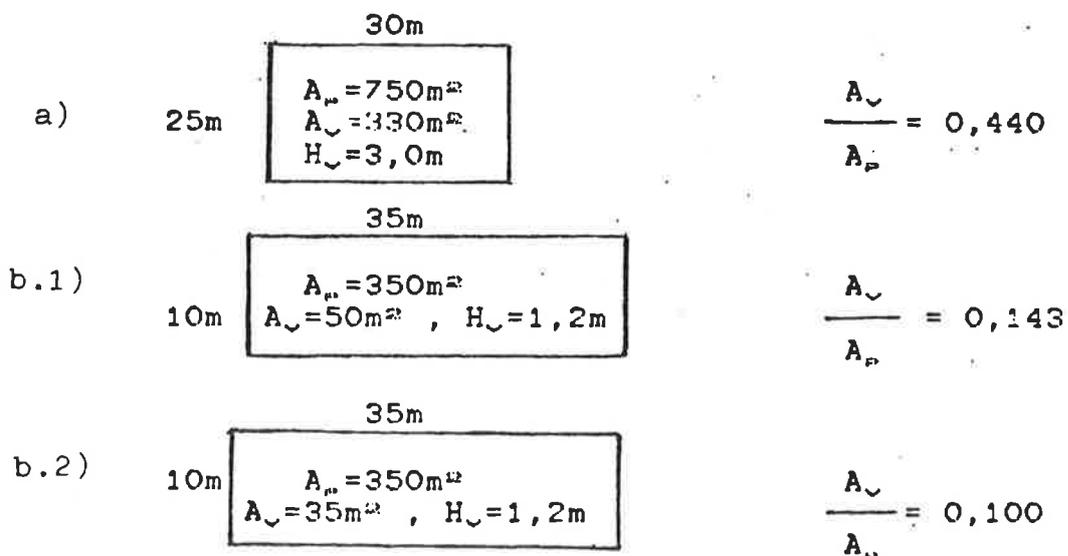


Figura 5.12 - Plantas esquemáticas de edifícios: a) edifício de escritórios com fachada cortina de vidro ao longo de todo o perímetro externo e de todo o pé-direito; b) edifícios residenciais com janelas possuindo altura média de 1,2 m.

Tabela 5.1 - Duração do incêndio em um pavimento em minutos.

equação W	planta(a)		planta(b.1)			planta(b.2)		
	(1)	(4)	(2)	(3)	(5)	(2)	(3)	(5)
10	13	19	12	10	14	17	14	20
20	26	19	23	19	28	33	28	40
30	39	19	35	29	42	50	42	60
40	52	19	46	39	56	66	56	80
50	65	19	58	49	70	83	69	100
60	78	19	70	58	84	100	83	120
70	91	19	81	68	98	116	97	141
80	104	19	93	78	112	133	111	161
90	117	19	104	87	126	149	125	181
100	130	19	116	97	140	166	139	201

Pode-se enfim, chegar a alguns resultados práticos a partir de expressões obtidas algumas com base experimental e outras teóricas, a maior parte delas baseadas na consideração de materiais combustíveis celulósicos e desenvolvidas sob certas condições particulares que impedem sua utilização indiscriminadamente. No entanto, é a partir deste tipo de resultado que se tem confeccionado as exigências de resistência ao fogo e, com a consciência de sua limitação, utilizar-se-á alguns dos resultados aqui citados para análises futuras dentro deste capítulo.

5.1.3.4 Levantamento de Potenciais Caloríficos

Conforme foi visto, o conhecimento do potencial calorífico existente nos edifícios é fundamental para a análise da severidade, ou em particular da duração de um eventual incêndio.

Na falta de estatísticas deste tipo divulgadas para o Brasil, passa-se à descrição de levantamentos realizados em outros países com o intuito de servirem os mesmos como referência para futuras discussões.

Levantamentos feitos pelo "National Bureau of Standards" - NBS (EUA) demonstraram as variações do conteúdo combustível existente nos edifícios, segundo sua utilização. Para um mesmo edifício, com uma dada utilização (escolas, escritórios, indústrias etc.), o potencial calorífico médio varia ainda dentro de certas faixas, em função da atividade desempenhada em cada ambiente.

Alguns dos resultados apresentados pelo NBS constam da Tabela 5.2. Observe-se, para o caso dos escritórios, que a maior parte dos ambientes (59%) contém potencial calorífico entre 0 e 75 kg de madeira/m², embora ocorram áreas com conteúdo combustível muito alto em menor porcentagem.

Essas variações relacionam-se com a gama de atividades desempenhadas, que implicam, além de salas de datilografia, por exemplo, em salas de arquivo, depósitos de papéis, materiais de limpeza, etc.

Tabela 5.2 - Potenciais caloríficos nos edifícios - EUA.
(103)

ATIVIDADE	PORCENTAGEM DA ÁREA TOTAL	VARIAÇÃO DO CONTEÚDO Kg madeira/m ²
INDÚSTRIA DE ARTES GRÁFICAS	37	0 - 75
	28	75 - 250
	35	250 - 500
PEQUENO ARMAZÉM (DEPÓSITO)	18	0 - 150
	51	150 - 375
	31	375 - 1285
GRANDE ARMAZÉM COMERCIAL	8	0 - 25
	78	25 - 75
	14	75 - 200
ESCOLA PÚBLICA DE 1º GRAU	99	0 - 75
	1	75 - 375
ESCOLA PÚBLICA (UNIVERSIDADE)	33	0 - 25
	64	25 - 50
	3	50 - 1280
ESCRITÓRIOS	59	0 - 75
	19	75 - 150
	22	150 - 430
HOSPITAL	82	0 - 25
	17	25 - 75
	1	75 - 100
APARTAMENTOS	100	50(médio)

(Fonte: National Bureau of Standards.)

Evidentemente, a quantidade de material combustível existente nos edifícios é influenciada pelos próprios padrões econômicos e culturais que caracterizam um dado país ou localidade.

Um outro conjunto de informações foi obtido em edifícios do Japão, cujos resultados estão mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Potenciais caloríficos nos edifícios - Japão.
(100)

ATIVIDADE	POTENCIAL CALORÍFICO (Kg madeira/m ²)	
Lojas	50	- 200
Salas de Aula	20	- 50
Bibliotecas - salas de leitura	50	- 350
Bibliotecas	300	- 600
Escritórios	30	- 150
Hospitais	30	- 60
Apartamentos	40	- 70
Hotéis	25	- 40

(Obs.: Levantamento feito em edifícios de concreto).

Especificamente quanto à distribuição em escritórios, os japoneses constataram que o valor médio situou-se em 62 Kg/m² (com um desvio padrão de 10,2 Kg/m²), conforme mostrado na Figura 5.13.

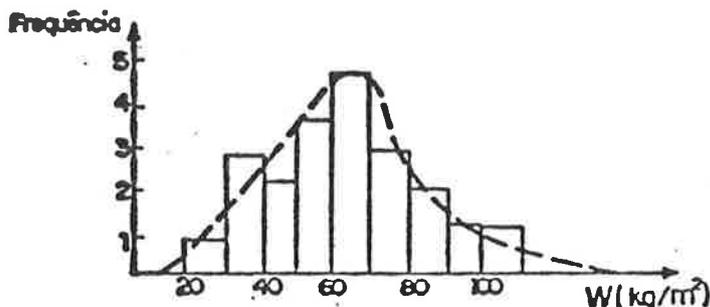


Figura 5.13 - Distribuição do potencial calorífico em edifícios de escritórios (JAPÃO).

Estabelecer um "padrão" de potencial calorífico, ou seja, parametrizá-lo em função do tipo de ocupação do edifício, tem sido a postura adotada em muitos códigos de construção, como forma de subsídio às exigências que os mesmos colocam quanto à resistência ao fogo. A associação mais direta entre quantidade de combustível e duração do incêndio, e desta última com a resistência ao fogo exigida, porém, pode ser criticada ao se ter em conta o conceito de severidade (conforme visto anteriormente).

A título de ilustração, a classificação inglesa (1928), estabelecia faixas de potencial calorífico, conforme segue:

Potencial calorífico baixo	:	até 60 Kg/m ²
médio	:	60 a 120 Kg/m ²
alto	:	120 a 240 Kg/m ²

sendo que a cada uma dessas faixas pode-se associar o tempo de duração do incêndio correspondente.

A norma alemã DIN 18230, por outro lado, possui um método de cálculo para determinação do potencial calorífico a ser considerado no projeto do edifício (108). O potencial calorífico unitário, que corresponde à quantidade de calor produzida em um incêndio, por m² de ambiente, é dada por:

$$q = \frac{\sum Q_i}{A} \quad (\text{Mcal/m}^2) \quad (5.11)$$

onde:

$Q_i = G_i \cdot C_i$ é a quantidade de calor total produzida por cada material (Mcal)

G_i é a massa total existente de cada material no ambiente (Kg)

C_i é o poder calorífico do material (Mcal/Kg)

A é a área do ambiente incendiado (m²)

O valor considerado para o potencial calorífico unitário é, portanto, um valor médio; entretanto, quando houver uma concentração de combustíveis muito acima da média em uma parte do edifício, a DIN 18230 estabelece a necessidade de se considerar essa região em separado.

Obtido o potencial calorífico unitário, existe uma correção a ser feita, tendo em vista os diferentes comportamentos de cada material durante sua queima. Para que se estabeleça uma correlação entre a curva temperatura-tempo de cada material e a curva normalizada (ISO R 834), o potencial calorífico unitário é multiplicado por um fator "m", obtendo-se o potencial calorífico "ideal":

$$q' = m \cdot q \quad (5.12)$$

sendo

$$m = \frac{\sum Q'_i}{\sum Q_i} \quad \text{com} \quad Q'_i = m_i \cdot Q_i \quad (5.13)$$

m_i - fator de correção aplicado a cada material

Os fatores "m" foram obtidos a partir de ensaios de incêndio com vários materiais, e permitem considerar a relação entre volume e superfície de combustível, expressa pela espessura de material (ver Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Fator de correção para o potencial calorífico calculado (segundo norma DIN 18230).

Material	Espessura (cm)	Fator m
Papel (folhas)	$d < 1$	1,3
Móveis leves	$1 < d < 4$	1,1
Móveis pesados	$4 < d < 10$	0,9
Vigas de madeira	$10 < d < 20$	0,7
Papel (em rolos)	$d > 20$	0,3
Benzina	-	1,3
óleo combustível	-	1,2

O fator de correção "m" é importante por permitir uma padronização de valores que possa levar ao estabelecimento de exigências de resistência ao fogo coerentes. Isto é observado, por exemplo, quando se atribui fatores que majoram o potencial calorífico de materiais de combustão rápida e intensa como folhas de papel, e minoram o potencial calorífico de materiais de combustão mais lenta (vigas de madeira). O cálculo preconizado pela DIN 18230 leva a resultados para o potencial calorífico ideal que se aproximam daqueles obtidos em levantamentos nos edifícios europeus. Os valores encontrados nesses levantamentos situaram-se em uma faixa da ordem de 80 a 100 Mcal/m² (ou 20 a 25 Kg madeira/m²), para escolas, escritórios e hospitais, com mobiliário de madeira.

5.1.4 Princípios da Consecução de Segurança

Deve-se sempre partir da premissa da possibilidade de ocorrência de um incêndio e, portanto, deve-se ter meios de proteção e mesmo de combate a ele.

A segurança ao fogo de um edifício, e em particular de suas lajes, pode ser encarada sob diversos pontos de vista. Em primeiro lugar pode-se distinguir dois papéis a serem cumpridos:

- proteção das vidas humanas presentes;
- preservação do património.

O primeiro aspecto constitui-se em requisito essencial, indiscutível; a própria resistência da estrutura do edifício por um certo prazo mínimo de submissão ao fogo, deve propiciar tempo suficiente de estabilidade do mesmo para que se verifique sua evacuação.

Quanto ao segundo aspecto, apesar de bastante relevante, possui carácter relativo, isto é, permite uma avaliação económica onde se analisam o investimento na proteção, gastos com seguro do imóvel e custos da reparação ou das perdas estimadas.

A segurança ao fogo pode ser estudada também quanto aos caminhos existentes para alcançá-la:

- solução estrutural;
- solução arquitetónica;
- adoção de sistemas de combate.

O primeiro deles relaciona-se à execução de um dimensionamento em que se considere as "solicitações" oriundas de um incêndio, expressas por exemplo através da minoração de resistências dos componentes estruturais e consideração das deformações originadas no aquecimento dos mesmos.

O segundo caminho, também denominado proteção passiva, diz respeito ao projeto arquitetónico do edifício, tratando de aspectos tais como: adoção de materiais de revestimento adequados, no que tange à sua própria reação ao fogo ou à proteção térmica que pode propiciar aos componentes a que estão associados; compartimentação de ambientes, no que se refere a dificultar a propagação de uma combustão nele iniciada, etc.

O terceiro caminho se relaciona à existência de sistemas para atuar sobre o fenómeno, isto é, de combater o incêndio

tentando extinguí-lo ou, ao menos, amenizar suas consequências. A idéia que orienta este caminho é a de se tentar destruir a cadeia representada pela reação de combustão.

A extinção ou mesmo a atenuação de um dos quatro fatores citados anteriormente como essenciais ao desenvolvimento do fenômeno (combustível, comburente, calor e chama) pode levar à extinção da combustão (Figura 5.14).

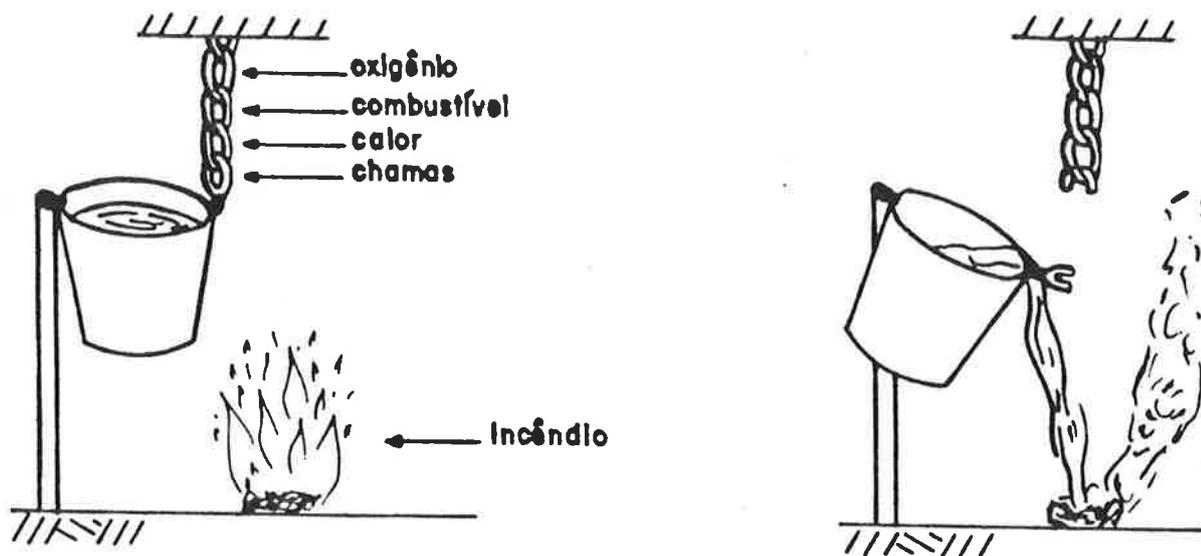


Figura 5.14 - Princípio da extinção das reações de combustão.

Os vários sistemas de combate diferem entre si quanto à forma de desintegrar a reação em cadeia característica da combustão. Assim é que, a extinção com água baseia-se essencialmente no resfriamento dos combustíveis, o uso de gás carbônico reduz a concentração de oxigênio disponível, a utilização de "halon" gera uma extinção da chama e a retirada dos móveis existentes em ambiente contíguo diminui a quantidade de material combustível disponível para uma eventual propagação do fogo.

5.2 A SEGURANÇA DA LAJE COMPOSTA QUANTO AO FOGO

A análise da segurança da laje composta quanto aos incêndios que se fará neste trabalho não abordará o efeito da adoção de sistemas de combate ao fogo. As discussões abrangerão principalmente as exigências de resistência ao fogo, que nascem da preocupação em se preservar as vidas humanas e o patrimônio, bem como as formas de proteção contra fogo relacionadas a soluções estruturais bem como arquitetônicas.

Os sistemas de combate ao fogo, apesar do relevante papel cumprido na consecução da segurança, não serão aqui abordados na medida em que perfazem um campo de certa forma independente no que tange ao tipo de laje utilizada.

Principia-se por um levantamento das exigências que são feitas quanto à resistência ao fogo das lajes em geral; discute-se, a seguir, caminhos para se cumprir estas exigências no caso da adoção de lajes compostas. Finalmente procede-se a uma descrição dos materiais de proteção disponíveis no mercado nacional, bem como das técnicas recomendadas para sua aplicação.

5.2.1 Exigências de Resistência ao Fogo para Lajes de Piso

Segundo Malhotra (107) não se sabe quando o termo "resistência ao fogo" foi primeiramente utilizado. Diz ele ainda que pode-se entendê-lo, de uma forma genérica, como a "imunidade aos efeitos do fogo num determinado grau".

A definição tecnológica de resistência ao fogo de um componente, sob uma visão qualitativa, consiste na medição do tempo durante o qual o mesmo, solicitado pelo fogo gerado em um forno, resiste antes da ocorrência de seu colapso (Figura 5.15).

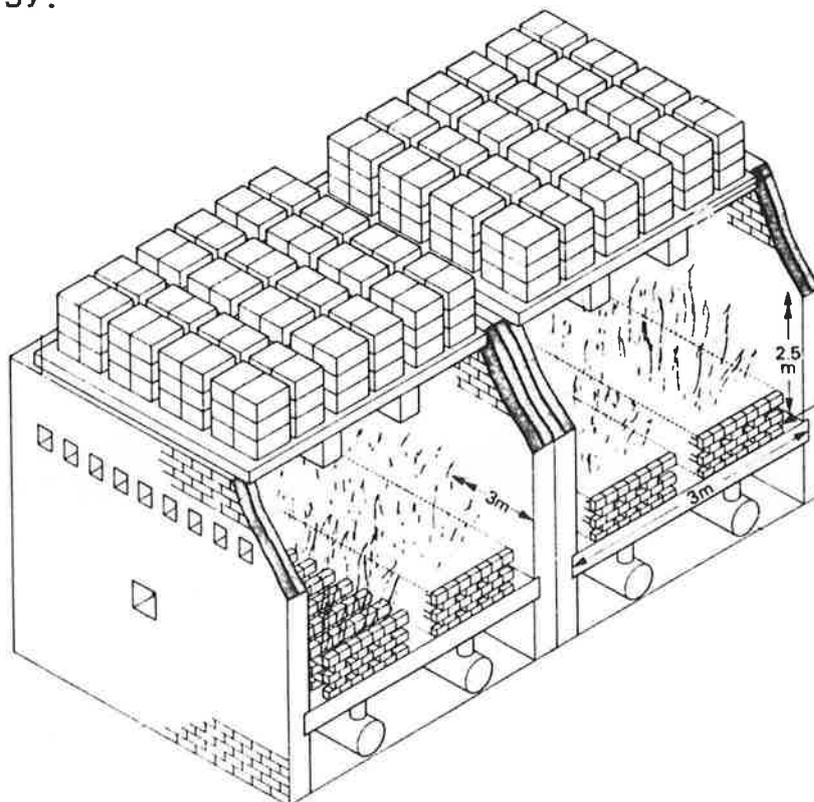


Figura 5.15 - Forno para ensaio de resistência ao fogo de lajes de piso usado na Inglaterra em 1901.

A NBR-5628 (106) indica com detalhes como se proceder à determinação da resistência ao fogo de componentes construtivos estruturais:

- o aquecimento é padronizado pela adoção da curva padrão temperatura-tempo;
- as condições de carregamento e de vínculos do componente real devem ser reproduzidas no ensaio;
- o colapso do componente é consignado no instante em que o primeiro de um dos três seguintes eventos ocorrer: falta de estabilidade (ruptura, deformação excessiva), falta de isolamento térmico (temperatura excessiva alcançada pela face não exposta), falta de integridade (surgimento de fissuras ou trincas que permitam a passagem de chamas ou gases quentes).

Os componentes são então classificados, segundo a duração do ensaio à qual resistem, em:

- F30 - resistência ao fogo de 30 min.
- F60 - resistência ao fogo de 60 min.
- F90 - resistência ao fogo de 90 min.
- F120- resistência ao fogo de 120 min.
- F180- resistência ao fogo de 180 min.
- F240- resistência ao fogo de 240 min.

A NBR-5628 prescreve ainda, para o caso de lajes, que "quando for admitida a contribuição de um acabamento de forro ou de forro suspenso para a resistência ao fogo de uma laje de piso ou de cobertura, a amostra deve incorporar esse acabamento ou esse forro".

5.2.1.1 Considerações Gerais Quanto à Definição das Exigências

O processo pelo qual são estabelecidos e verificados os requisitos de resistência ao fogo para as estruturas dos edifícios apresenta as mesmas linhas gerais, na maior parte dos países (Figura 5.16).

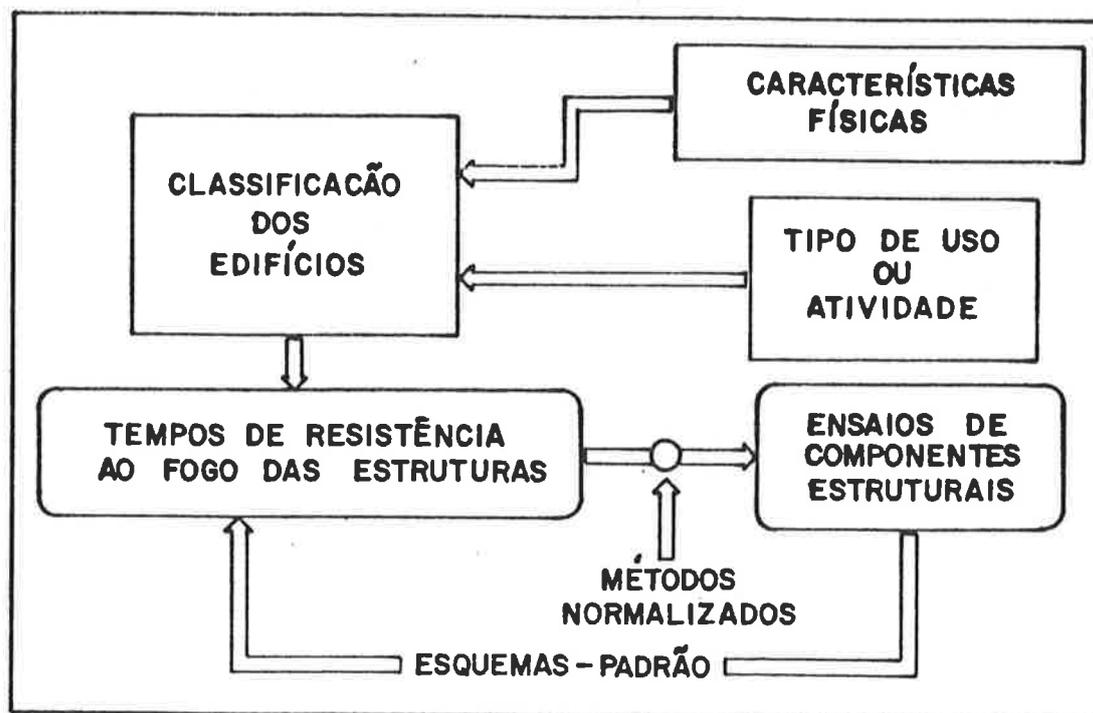


Figura 5.16 - Relações esquemáticas entre características dos edifícios e tempos de resistência ao fogo das estruturas.

Sem considerar as naturais diferenças quanto aos critérios estabelecidos por distintos órgãos ou instituições nos vários locais do mundo, esse processo consiste, em termos simples:

- na classificação do edifício segundo padrões de altura, área construída, materiais de construção empregados, localização (características físicas) e tipo de uso ou atividade;
- no estabelecimento de exigências (tempos mínimos) de resistência ao fogo para as estruturas e outros elementos da construção;
- na verificação do atendimento às exigências estabelecidas, através da realização de ensaios segundo métodos normalizados, ou da adoção de componentes construtivos já ensaiados e certificados (esquemas-padrão).

A classificação dos edifícios, determinada por critérios existentes em normas, códigos de construção ou métodos de avaliação de seguros, mede o "potencial de danos" associado à ocorrência do incêndio. O potencial calorífico provável existente, bem como a severidade resultante, estão normalmente considerados de forma implícita na classificação

de tipo de uso ou atividade; como visto existem exceções, caso da norma alemã, que explicita um cálculo para o potencial calorífico, qualquer que seja a atividade.

Os critérios de classificação dos edifícios e o estabelecimento de exigências para a estrutura diferem nos vários países, o que não ocorre com os métodos de ensaios de resistência ao fogo, muito semelhantes. Como decorrência disso, aos tempos de resistência ao fogo, que são distintos, podem ser associadas reservas de resistência também distintas diante de uma mesma severidade de incêndio, dado o emprego universal da curva temperatura-tempo estabelecida pela norma ISO R834.

Cabe salientar que algumas vezes, por dificuldades de carregamento da peça submetida ao aquecimento através do forno, procede-se à medição das temperaturas ocorridas ao longo do corpo de prova para, através de análises posteriores de perda de resistência mecânica devido ao aquecimento, chegar-se a uma resistência ao fogo teórica.

Serão discutidas a seguir as diferentes exigências de resistência ao fogo para as estruturas, segundo normas e códigos adotados na Alemanha, França, Estados Unidos e Brasil.

5.2.1.2 Alemanha Ocidental

Foi visto anteriormente neste trabalho (108) como é feita a determinação do potencial calorífico nos ambientes segundo a DIN 18230. A mesma norma propõe categorias de proteção dos componentes dos edifícios a partir do conteúdo de combustível envolvido e das características físicas (área e número de pavimentos) do edifício considerado.

O conceito utilizado é o de potencial calorífico de cálculo, dado por:

$$q_c = f \cdot q' \quad (\text{Mcal/m}^2) \quad (5.14)$$

onde:

q_c - potencial calorífico de cálculo
 f - fator do edifício
 q' - potencial calorífico ideal (Mcal/m²)

O fator "f" é tabelado para diferentes tipos de edifícios. A Tabela 5.5 contém fatores aplicáveis a edifícios com ventilação moderada dos ambientes; a área a ser considerada no acessamento das linhas é a área do ambiente, ou a área do pavimento, quando o mesmo não for dividido por elementos resistentes ao fogo.

Tabela 5.5 - Fator do edifício para determinação do potencial calorífico de cálculo (DIN 18230).

ÁREA (m ²)	NÚMERO DE PAVIMENTOS					
	1	2	3	4	5	> 6
< 1600	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
1600-3000	1,2	1,44	1,56	1,68	1,80	1,92
3000-5000	1,4	1,68	1,82	1,96	2,10	2,24
5000-7000	1,6	1,92	2,08	2,24	2,40	2,56
7000-10000	1,8	2,16	2,34	2,52	2,70	2,88
> 10000	2,0	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20

A partir da determinação de q_c , os edifícios são classificados em cinco categorias de exigências de resistência ao fogo, como pode ser visto na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Categorias de proteção contra incêndio (DIN 18230).

Potencial calorífico calculado (q_c)	Categoria
< 75	I
75-150	II
150-300	III
300-450	IV
450-600	V
> 600	V*

(*) com precauções especiais.

A cada categoria corresponderão exigências de tempos de resistência ao fogo dos elementos estruturais (pilares, vigas, lajes, treliças de cobertura), exigências estas transcritas, na Tabela 5.7, para o caso das lajes.

Tabela 5.7 - Exigências de resistência ao fogo para as lajes (DIN 18230).

FUNÇÃO ESTRUTURAL	CATEGORIA DO EDIFÍCIO				
	I	II	III	IV	V
Lajes	-	F30	F30	F60	F90

5.2.1.3 França

As exigências francesas quanto à construção e utilização dos edifícios são estabelecidas por decretos ("arrêtés") (110). Os ensaios de resistência ao fogo seguem a curva normalizada pela ISO, e os elementos são classificados, segundo sua estabilidade, em:

SF	1/4	h.	-	estáveis ao fogo por 15 minutos
SF	1/2	h.	-	estáveis ao fogo por 30 minutos
SF	1	h.	-	estáveis ao fogo por 60 minutos
SF	1 1/2	h.	-	estáveis ao fogo por 90 minutos
SF	2	h.	-	estáveis ao fogo por 120 minutos

Essa classificação possui ainda graus de 3, 4 e 6 horas, que porém não são exigidos pela legislação, ainda que possam ser atingidos nos ensaios dos componentes estruturais.

A legislação francesa distingue três categorias básicas, segundo características físicas e de uso dos edifícios: as "construções habitacionais", os "estabelecimentos que recebem público" e os "imóveis de grande altura".

A categoria denominada "construções habitacionais", pertencem os edifícios de uso habitacional individual ou coletivo, cuja altura máxima, definida pela distância do piso do pavimento mais elevado ao solo, for inferior a 50 metros. Essa categoria é ainda subdividida em quatro outras, sempre segundo o número de pisos ou a altura do piso mais elevado.

São considerados "estabelecimentos que recebem público" hotéis, pensões, restaurantes, bares, casas de espetáculos, locais de culto religioso, discotecas, salões de jogos, salas de conferências, estabelecimentos de ensino, bibliotecas, salas de exposições, centros comerciais, lojas, bancos, escritórios administrativos públicos ou privados, centros esportivos cobertos e colônias de férias, entre outros.

Quanto à denominação "imóveis de grande altura", tal classificação se aplica: aos edifícios de uso habitacional, quando possuírem o piso do andar mais alto acima de 50 metros em relação ao solo; aos demais tipos de utilização, quando a altura referida ultrapassar os 28 metros.

Embora cada categoria obedeça a regulamentação específica, os dados relativos às exigências de resistência ao fogo para componentes estruturais foram agrupados na Tabela 5.8, de forma a se ter um panorama geral conjunto. É importante destacar que, às exigências de projeto relativas à resistência ao fogo, somam-se outras, inclusive no que concerne ao controle do conteúdo combustível permitido no interior dos edifícios; a regulamentação francesa, portanto,

posui implícita essa relação entre potencial calorífico e tempos de resistência ao fogo.

Tabela 5.8 - Exigências de resistência ao fogo para os componentes estruturais (França).

CONSTRUÇÕES HABITACIONAIS COM PISO MAIS ELEVADO A MENOS DE 50 M DO SOLO	ESTABELECIMENTOS QUE RECEBEM PÚBLICO * COM PISO MAIS ELEVADO A MENOS DE 28M DO SOLO	IMÓVEIS DE GRANDE ALTURA COM QUALISQUER USOS
CATEGORIA RES. AO FOGO	ALTURA DO PISO MAIS ELEVADO	RESIST. AO FOGO
1	S/F 1/4 h.	S/F 2 h.
2	S/F 1/2 h.	Térreo S/F 1/2h.
3	S/F 1 h.	< 8 m. S/F 1/2 a 1h.++
4	S/F 1 1/2h.*	> 8 m. S/F 1 a 1 1/2h.++

OBSERVAÇÕES:

CONSTRUÇÕES HABITACIONAIS:

- Categoria 1: habitações individuais com até dois níveis (acima do solo);
- Categoria 2: habitações individuais com mais de dois níveis, ou coletivas com o piso mais elevado a não mais de 8 m do solo;
- Categoria 3: as que, não se enquadrando em 1 ou 2, tenham o piso mais alto a menos de 28 m do solo;
- Categoria 4: idem anterior, mas com piso mais elevado entre 28 e 50 m.

(*) OS PISOS PODERÃO RESISTIR APENAS 1H. NOS EDIFÍCIOS COM PISO MAIS ELEVADO A MENOS DE 35 M.

(+) QUANDO O ESTABELECIMENTO OCUPAR INTEGRALMENTE O EDIFÍCIO CONSIDERADO.

(++) DEPENDENTE DA LOTAÇÃO (CAPACIDADE) DO ESTABELECIMENTO.

5.2.1.4 Estados Unidos

Os norte-americanos possuem, além dos códigos locais, cinco códigos principais de construção (111), nacionalmente

reconhecidos. Tais códigos estabelecem exigências de resistência ao fogo, sempre a partir de uma classificação dos edifícios. Dentre esses cinco códigos, será abordado o "Uniform Building Code" - UBC, cujas disposições são apresentadas neste trabalho.

A classificação feita pelo UBC reúne as ocupações possíveis para os edifícios em grupos e sub-grupos. Assim como as ocupações, os possíveis tipos de construção também são classificados em categorias, cujas características o código define com base na resistência ao fogo. Os tipos de construção, segundo requisitos de resistência ao fogo, definidos pelo Uniform Building Code, estão dados na Tabela 5.9, na qual se indicam os valores de resistência ao fogo exigidos das lajes.

Tabela 5.9 - Tipos de construção e exigências de resistência ao fogo para as lajes (Uniform Building Code - EUA).

COMPONENTE	TIPO I		TIPO II	
	INCOMBUSTÍVEL			
	F.R.	F.R.	1 HORA	N.R.
Pisos	2 h.	2 h.	1 h.	-
Coberturas	2 h.	1 h.	1 h.	-

OBSERVAÇÕES:

- F.R.: construções classificadas como "fogo-resistentes";
- N.R.: construções "não-resistentes".
- As exigências transcritas referem-se aos edifícios construídos com componentes incombustíveis, apenas, embora os outros materiais também sejam alvo do mesmo código.

Qualquer que seja o tipo de ocupação do edifício, ele poderá ter área, altura e número de pavimentos ilimitados, desde que sua construção possua características "tipo I", quanto à resistência ao fogo. Porém, para os outros tipos de construção, as limitações de altura e número de pavimentos é bastante severa, e tanto maior quanto menor a resistência ao fogo correspondente. São igualmente colocadas restrições quanto às áreas máximas permitidas, no caso de edifícios com pavimento único.

Para edifícios de escritórios, tem-se:

- construção tipo I: altura e área ilimitadas;
- construção tipo II-F.R.:
 - altura máxima de 160 pés (48,8m);
 - número máximo de pavimentos: 12;
 - área máxima (pavimento único): 39900 pé² (3707 m²);
- construção tipo II - 1 hora:
 - altura máxima de 65 pés (19,8m);
 - número máximo de pavimentos: 4;
 - área máxima (pavimento único): 18000 pé² (1672 m²);
- construção tipo II - N.R.:
 - altura máxima de 55 pés (16,8m);
 - número máximo de pavimentos: 2;
 - área máxima (pavimento único): 12000 pé² (1115 m²).

No caso de locais de reunião (auditórios, por exemplo), as restrições são muito maiores, a ponto dos edifícios desse tipo apenas poderem ser construídos dentro dos padrões tipo I e tipo II - F.R., este último com no máximo quatro pavimentos. As restrições são também maiores que as colocadas para os edifícios de escritórios, no caso de escolas, hospitais, e várias outras ocupações.

5.2.1.5 Brasil

Dentro do universo de normas editadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT não existe texto genérico que contemple o assunto "resistência ao fogo dos edifícios". No caso específico do concreto, vale a NBR-5627/80 - "Exigências Particulares das Obras de Concreto Armado e Protendido em Relação à Resistência ao Fogo" (112).

A NBR-5627, antes de estabelecer os cobrimentos para as armaduras das peças, necessários à obtenção de cada grau de resistência ao fogo, propõe uma relação direta entre o potencial calorífico existente e o grau de resistência ao fogo necessário, dada por:

$$t_r = 2 W \quad (5.15)$$

onde:

t_f = resistência ao fogo exigida (min)
 W = potencial calorífico (kg madeira/m²)

e estabelecendo, a partir disto, quatro classes para os componentes estruturais: F60 (1 hora), F120 (2 horas), F180 (3 horas), F240 (4 horas).

Restam, porém, as exigências de legislação particulares de cada município. Em São Paulo, o Código de Edificações (113) apresenta o texto a seguir, relativo a "particularidades construtivas e dimensionamento dos elementos":

"Estruturas - Todas as partes da construção com função de suporte como colunas, pilares e lajes, além de atender às solicitações das cargas incidentes devem apresentar resistência ao fogo, no mínimo, de 4 horas".

No âmbito ainda deste código, as lajes de concreto armado com 10 cm de espessura são consideradas como padrão para uma efetiva separação entre andares sucessivos no que tange à resistência ao fogo.

Além das normas técnicas oficiais e códigos de construção municipais, devem ser mencionadas as exigências das companhias de seguro, que vão condicionar as decisões a nível dos sistemas de segurança do edifício, inclusive quanto à proteção das estruturas. Tal condicionamento fica claro ao se examinar a "Tarifa Seguro-Incêndio do Brasil" (114): é considerada "construção superior" ou "classe 1 de construção" (classificação que implica em menores taxas) aquela com "estrutura integral de concreto armado ou de aço protegida por concreto ou alvenaria" e "pisos de todos os pavimentos constituídos por lajes de concreto armado ou lajes pré-moldadas". No caso da não obediência às prescrições acima, o edifício será considerado como de uma classe de construção inferior, pagando taxas mais altas de seguro contra incêndio.

5.2.1.6 Críticas à Situação Atual no Brasil Relacionadas à Laje Composta

Os resultados práticos de duração do incêndio, listados anteriormente na Tabela 5.1, levaram à seguinte relação entre o potencial calorífico e a duração do incêndio:

- planta (a)/equação (1) : 1,30
- planta (a)/equação (4) : 1,90 a 0,19
- planta (b.1)/equação (2) : 1,16
- planta (b.1)/equação (3) : 0,97
- planta (b.1)/equação (5) : 1,40
- planta (b.2)/equação (2) : 1,66
- planta (b.2)/equação (3) : 1,39
- planta (b.2)/equação (5) : 2,01

A NBR-5627 ao propor uma relação igual a 2, entre a resistência ao fogo exigida e o potencial calorífico do ambiente, não poderia ser de imediato criticada ao se observar as relações práticas determinadas.

No entanto há que se ressaltar a inexistência de levantamentos estatísticos dos potenciais caloríficos presentes nos vários tipos de edifícios aqui no Brasil; mais que isto, um levantamento deste tipo levaria, para um determinado tipo de edifício, a uma distribuição estatística de potenciais. A definição do valor de potencial a adotar para o estudo da resistência ao fogo, garantida a segurança das vidas humanas, passa a ser uma escolha econômica, onde se ponderam os gastos com proteção adicional com as perdas associadas a um eventual sinistro. Neste sentido cabe uma discussão maior quanto a esta prescrição.

Quanto ao Código de Edificações de São Paulo, cabe salientar de início as altas exigências prescritas para o caso das lajes; além de não serem distinguidas dos outros componentes estruturais, a resistência a quatro horas de fogo mostra-se bastante superior aos padrões verificados em outros países, sendo que em todos os casos citados neste trabalho as exigências não ultrapassaram a duas horas.

A citação da laje de concreto armado com 10 cm de concreto de espessura como padrão tradicional entra em conflito direto com as prescrições da NBR-5627 (112), que para lajes de concreto armado resistentes a quatro horas de fogo exige como dimensão mínima 17,5 cm. A laje composta teria portanto de obedecer à exigência de quatro horas, já que não se enquadra neste padrão tradicional.

Observe-se ainda que, estimando-se a duração dos incêndios nos casos práticos citados, para um potencial calorífico de 62 kg/m^2 (valor médio para os escritórios japoneses), ter-se-ia:

- planta (a)/equação (1) : 81 min
- planta (a)/equação (4) : 19 min
- planta (b.1)/equação (2) : 72 min
- planta (b.1)/equação (3) : 60 min
- planta (b.1)/equação (5) : 87 min
- planta (b.2)/equação (2) : 103 min
- planta (b.2)/equação (3) : 86 min
- planta (b.2)/equação (5) : 124 min

que são bastante inferiores à exigência do Código.

Quanto às taxações impostas pelo IRB ocorre uma discriminação quanto às lajes compostas, já que a sua utilização implicaria diretamente na classificação do edifício em uma classe inferior de construção. Ver-se-á

adiante que, mesmo uma laje composta sem revestimento algum de forro pode apresentar resistência ao fogo adequada.

5.2.2 Recomendações Quanto às Lajes Compostas

Discutiu-se no início deste capítulo a importância do estudo da resistência ao fogo da laje composta:

- trata-se de um componente estrutural;
- o aço é utilizado com função estrutural;
- a chapa de aço, a princípio, estará exposta diretamente à ação do fogo (o que não ocorre com o concreto armado, onde tem-se um recobrimento das armaduras);
- a chapa de aço, estando situada no ponto mais alto do ambiente, estará sujeita às mais altas temperaturas verificadas no mesmo.

Cabe em particular salientar que, tratando-se de um componente estrutural, sua eventual ruptura pode gerar o colapso de parte do edifício; neste aspecto, porém, as lajes desempenham papel menos fundamental que os pilares e vigas, já que o trajeto dos carregamentos verticais dá-se das lajes para as vigas e destas para os pilares.

Mais que isto, conforme afirma Malhotra (107), "no caso de vigas, com três faces expostas à troca de calor, a temperatura cresce mais rapidamente que em uma laje" e que, no caso de troca de calor por quatro faces, "a elevação da temperatura em pilares é ainda mais rápida que em vigas de mesma largura".

Passa-se a seguir à discussão a respeito de como se conseguir lajes compostas seguras em relação ao incêndio, passando inicialmente pela discussão da influência da elevação de temperatura sobre os materiais utilizados e pela análise de aspectos associados à concepção do componente para, finalmente, fornecer alguns exemplos de componentes de resistência ao fogo reconhecida, seja por ensaios normalizados em fornos, seja por considerações teóricas.

5.2.2.1 O Comportamento dos Materiais Constituintes Frente à Elevação da Temperatura

Discute-se o efeito verificado sobre o material aço, presente na confecção da chapa dobrada, bem como o concreto. Analisa-se, sucintamente, algumas influências sobre a interação chapa-concreto, bastante importante no trabalho solidário que caracteriza a laje composta.

5.2.2.1.1 O Material Aço

O aço, apesar de classificado como material incombustível, é bastante sensível à elevação da temperatura. Esta sensibilidade se traduz em uma redução acentuada da resistência mecânica dos componentes de aço para temperaturas facilmente alcançáveis durante um incêndio.

A variação da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade com a temperatura podem ser vistos na Figura 5.17, conforme citado pelo CSTB (115).

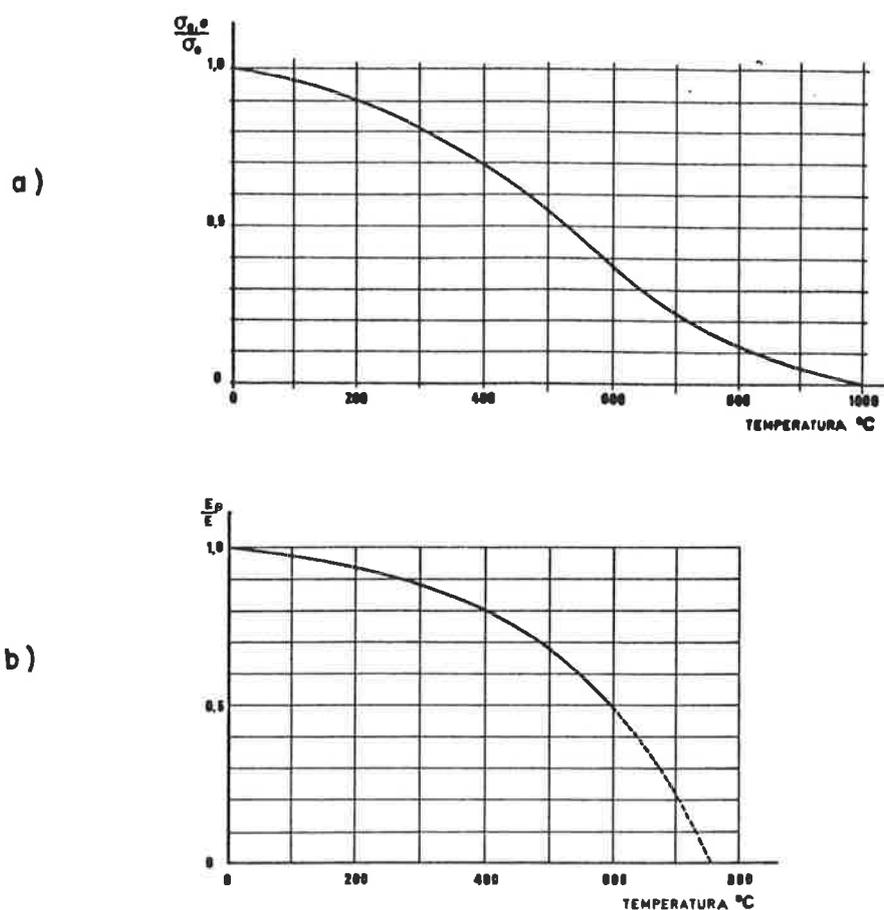


Figura 5.17 - Variação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura (em relação à temperatura ambiente): a) tensão de escoamento; b) módulo de elasticidade.

Malhotra (107) apresenta "curvas clássicas tensão-deformação para aço comum", conforme ilustrado na Figura 5.18.

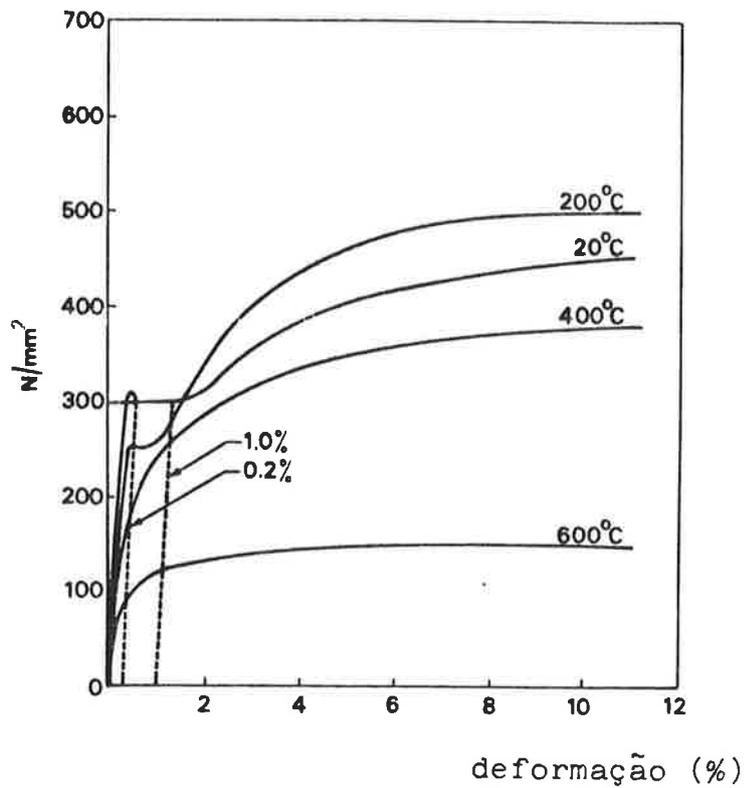


Figura 5.18 - Curvas tensão-deformação para aço estrutural comum (ASTM A 36).

Berto (116), quantifica a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas do aço conforme indicado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Efeito da temperatura nas propriedades elásticas do aço.

Propriedades elásticas	Faixas de temperatura (T)		
	20 a 300°C	300 a 700°C	700 a 900°C
$\sigma_{eT} / \sigma_{e20}$	$1 - \frac{T}{3000}$	$0.9 - \frac{T - 300}{500}$	$0.1 - \frac{T - 700}{200}$
E_T / E_{20}	$1 - \frac{T}{3000}$	$0.9 - \frac{T - 300}{611}$	

Quanto à variação de suas propriedades térmicas, considera-se a seguir, a deformação térmica como também a condutividade do aço sob altas temperaturas.

A deformação total de um componente de aço, utilizado em uma determinada estrutura, sob a ação de elevação da temperatura, pode ser considerada, segundo Malhotra (107), como a soma de três parcelas:

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_m + \epsilon_s \quad (5.16)$$

onde:

ϵ_1 = deformação térmica do componente descarregado;
 ϵ_m = deformação instantânea devido ao carregamento;
 ϵ_s = deformação lenta.

Quanto à primeira parcela, também denominada expansão térmica, este mesmo autor apresenta resultados experimentais, onde estuda-se vários aços, sob a forma de um gráfico (Figura 5.19). Cita ainda que, aproximando-se a curva obtida por uma reta, pode-se escrever a seguinte expressão simplificada:

$$\epsilon_1 = 1,4 \times 10^{-5} T_m \quad (\text{m/m}) \quad (5.17)$$

onde:

T_m = temperatura do aço.

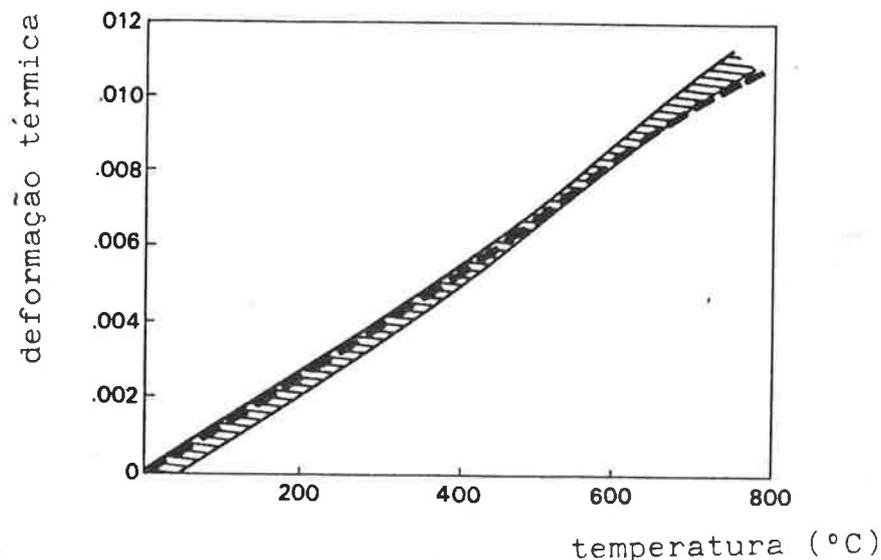


Figura 5.19 - Expansão térmica do aço.

Apesar de Malhotra (107) citar que "ao contrário do concreto, o aço não é submetido a deformações transitórias" (no concreto tem-se deformações devido a transformações químicas da pasta de cimento), Lie (95) chama a atenção para um fenômeno isolado que ocorre por volta da temperatura de 700°C, quando ocorre uma transformação do material em austenita (Figura 5.20). Ressalta porém este último que, "para componentes estruturais de aço carregados, este fenômeno é de pouca importância porque acima de 700°C o aço já perdeu praticamente toda sua resistência".

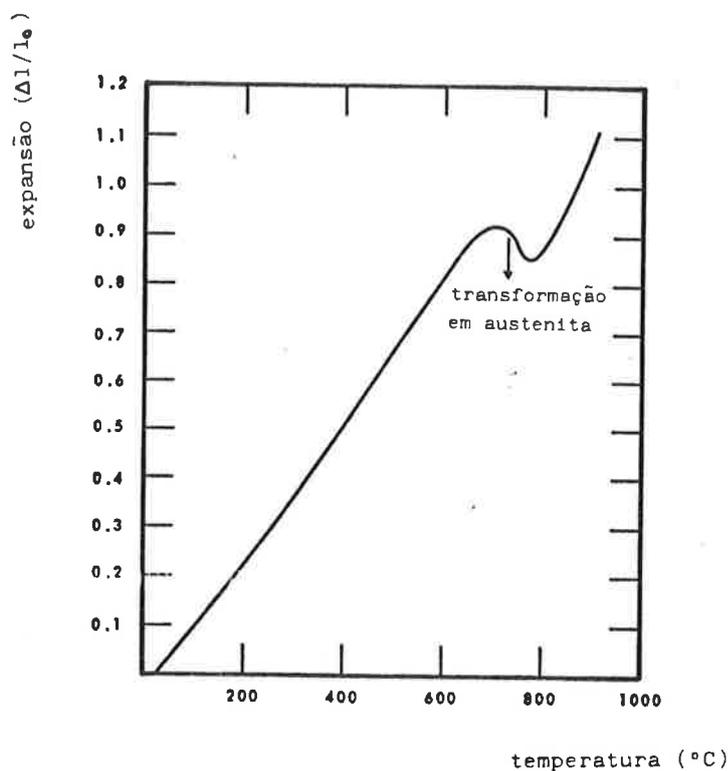


Figura 5.20 - Curva típica de expansão linear do aço em função da temperatura.

Lie (95) apresenta ainda a influência da temperatura no coeficiente de expansão linear do aço, conforme mostrado na figura 5.21, onde nota-se um limite superior e outro inferior para a variação dos resultados conforme o aço estudado.

Ressalta ainda que "o coeficiente de expansão do aço aumenta pouco com a temperatura e que as diferenças entre os dados existentes para vários aços a elevadas temperaturas são pequenas".

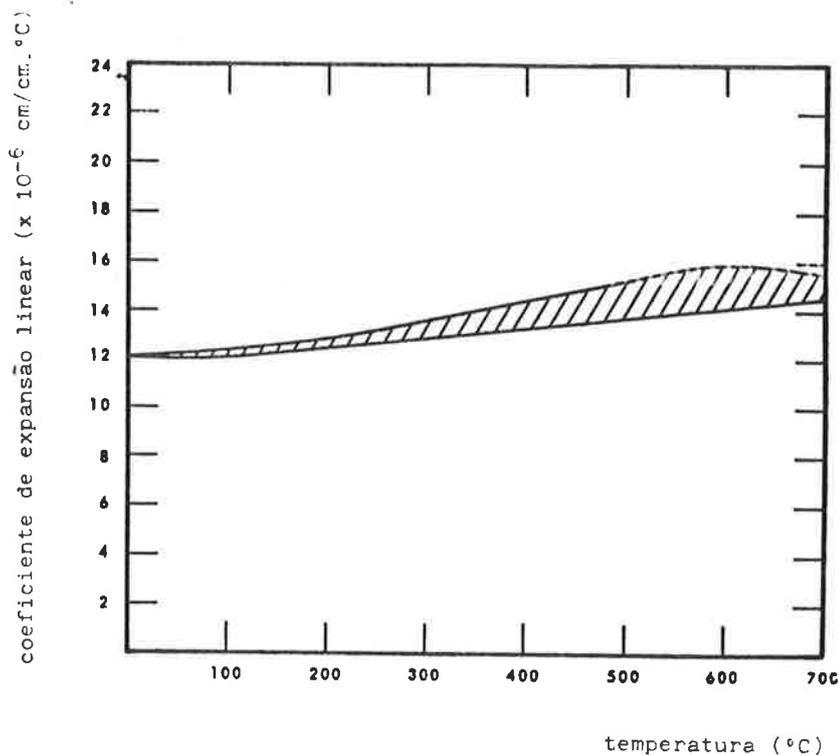
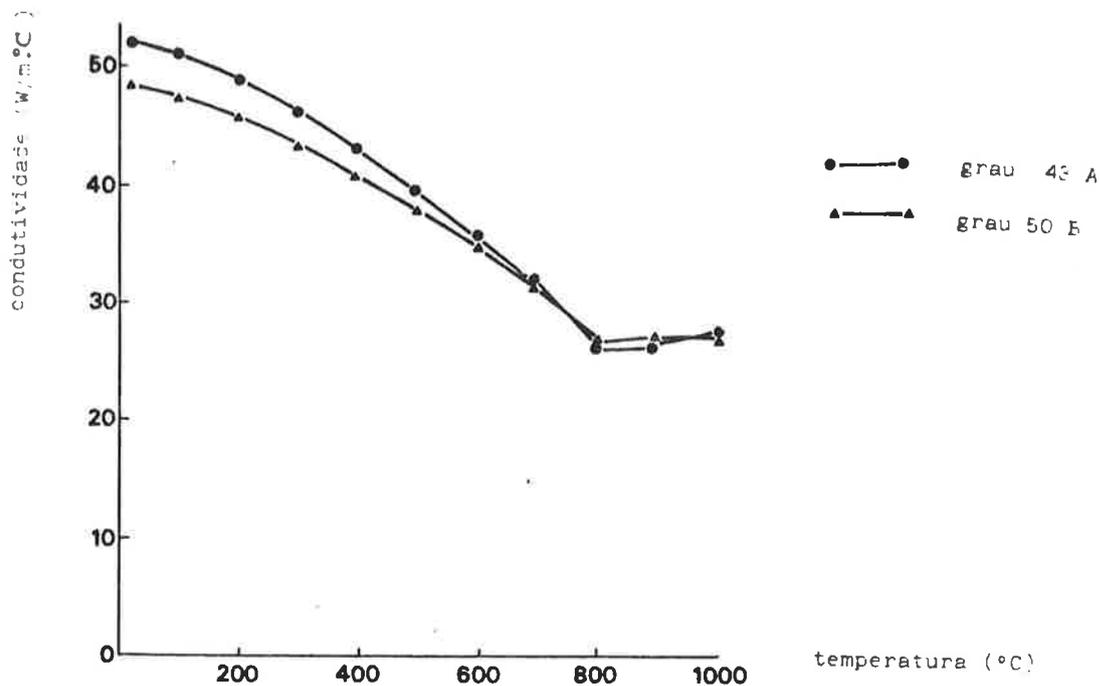


Figura 5.21 - Coeficiente de expansão linear do aço em função de grandes variações de temperatura.

Quanto à condutividade térmica do aço, Malhotra (107) afirma que ela "é alta em comparação com a do concreto; à temperatura ambiente é de aproximadamente 50 W/m°C enquanto para concretos de densidade normal este valor fica abaixo de 2 W/m°C". Cita ainda que resultados experimentais de outros pesquisadores têm mostrado que a condutividade térmica "decrece com a elevação da temperatura e depende da composição do material. Apresenta resultados experimentais obtidos para "dois aços estruturais comumente usados na Inglaterra", conforme ilustrado na Figura 5.22.

5.2.2.1.2 O Material Concreto

Os efeitos da elevação da temperatura sobre a resistência mecânica do concreto são distintos em função do tipo de solicitação a que o mesmo está sujeito. Neville (62) cita que "a resistência à flexão é mais alterada do que a resistência à compressão"; apresenta ainda uma comparação entre a variação percentual da resistência à tração e à compressão do concreto com o aumento da temperatura conforme indicado na Figura 5.23.



GRAU	TENSAO DE ESCOAMENTO	TENSAO DE RUPTURA	TENSAO DE PROJETO
43 A	250 N/mm ²	440 N/mm ²	165 N/mm ²
50 B	350 N/mm ²	580 N/mm ²	230 N/mm ²

Figura 5.22 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura para dois tipos de aço especificados pela BS 4360.

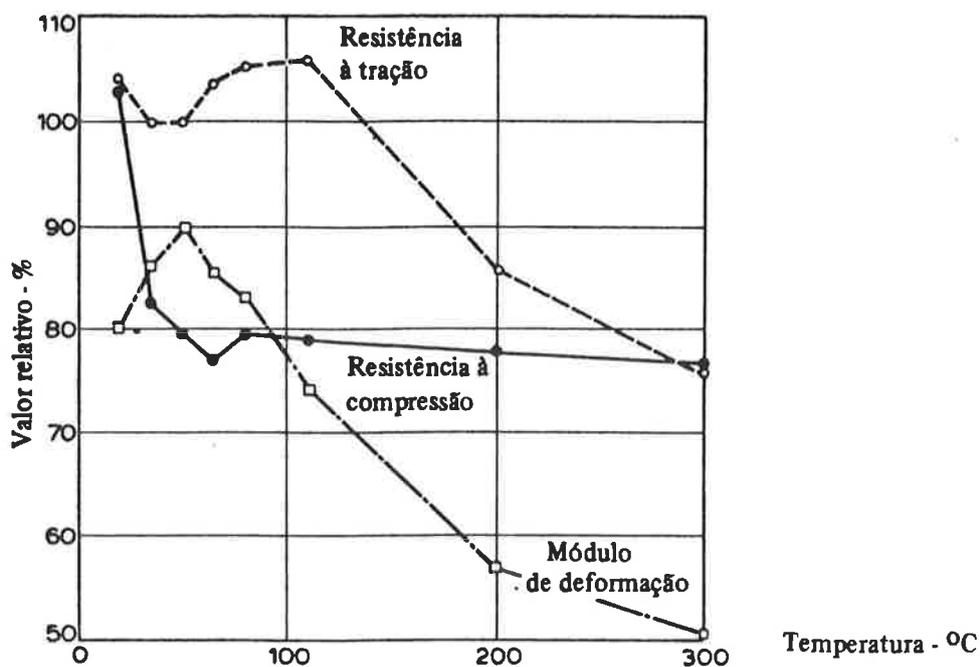


Figura 5.23 - Resistência à compressão e à tração, a diversas temperaturas, em relação aos valores à temperatura ambiente.

Malhotra (107), no entanto, salienta que "em função de o concreto ser utilizado nas estruturas principalmente para resistir a esforços de compressão, há muito interesse em se conhecer o efeito de altas temperaturas sobre a resistência à compressão". Indica ainda, conforme a Figura 5.24, uma comparação entre estudos realizados por alguns pesquisadores para concretos de densidade normal.

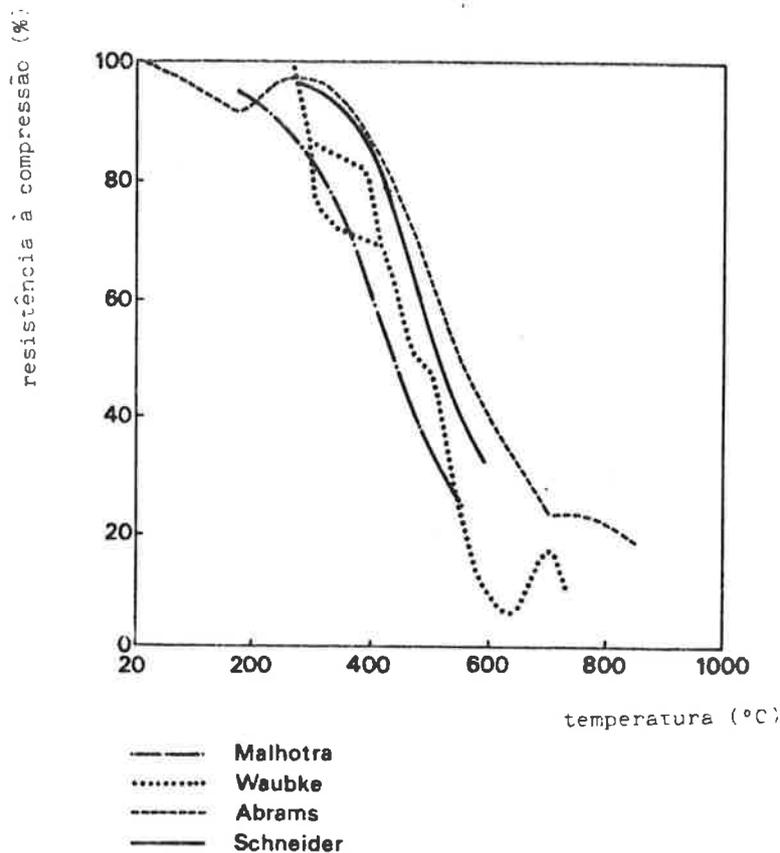


Figura 5.24 - Resistência à compressão de concretos de densidade normal, a temperaturas elevadas, em ensaios sem pré-carregamento.

Este mesmo autor demonstra através de resultados experimentais que, a existência de pré-carregamentos - situação mais próxima da realidade - propicia resultados mais favoráveis.

Almeida (117) também ilustra comparações de experimentos quanto à variação de resistência à compressão (Figura 5.25).

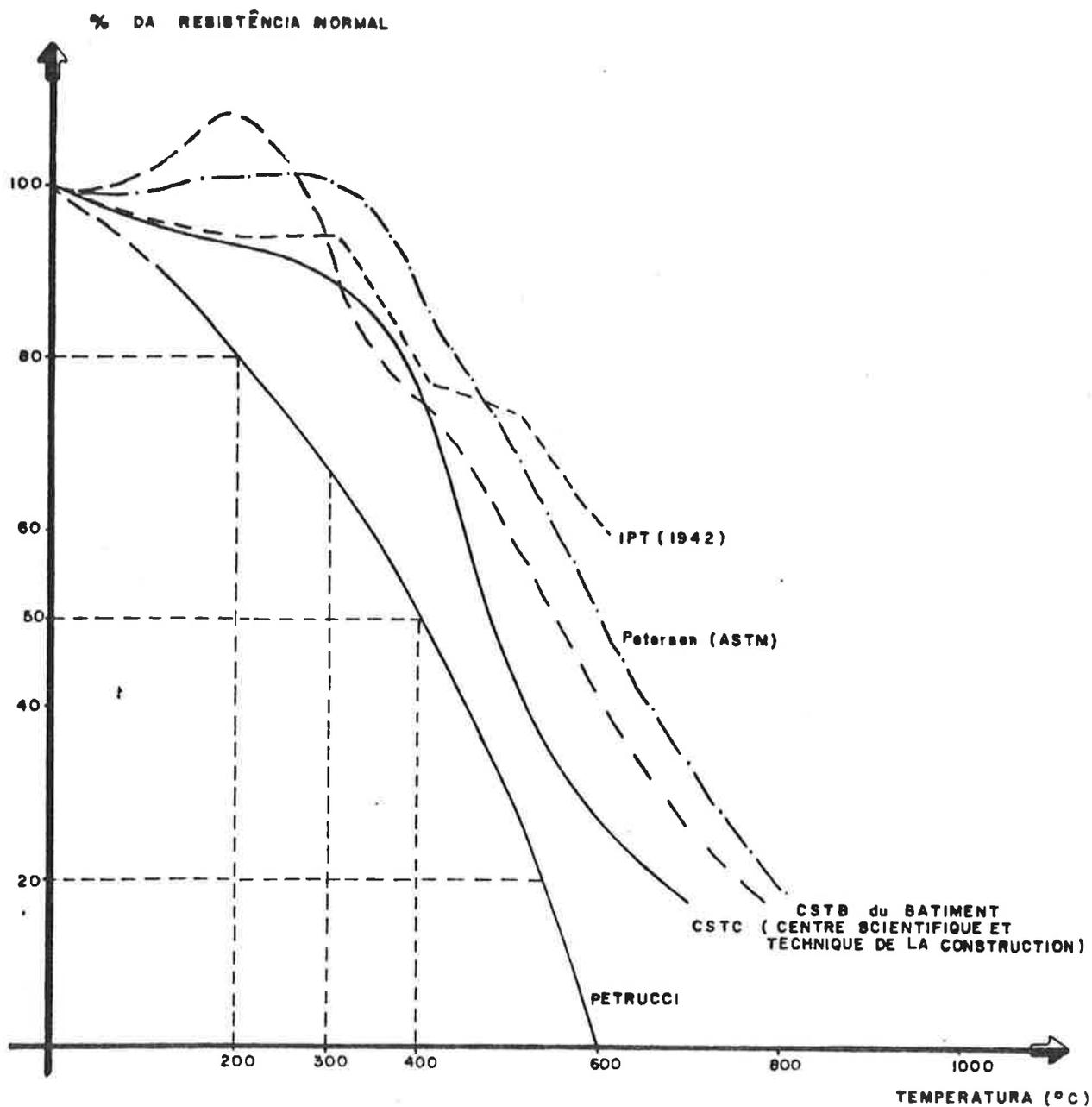


Figura 5.25 - Variações da resistência mecânica do concreto em função da temperatura.

Este último autor apresenta ainda, através da Tabela 5.11, os efeitos da elevação da temperatura sobre o concreto, que impliquem em variação de sua resistência. A título de elucidação destas informações, salienta-se que a água existente no concreto pode se encontrar sob quatro formas:

água de absorção, capilar, de gel e quimicamente hidratada. Enquanto as duas primeiras estão associadas a um equilíbrio higrotérmico com o meio, em função da existência de porosidade aberta no concreto, a água de gel está intimamente ligada ao contínuo desenvolvimento da hidratação do cimento, e a última representa a parcela que virtualmente reagiu com o cimento. A desidratação da água quimicamente ligada, simplificada, representa a transformação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) - produto da hidratação do cimento - em óxido de cálcio (CaO).

Tabela 5.11 - Efeitos de temperatura sobre o concreto.

Temperatura (°C)	Efeitos sobre o concreto
até 100	nenhuma influência
100 a 150	o concreto perde água capilar e de absorção
150 durante longo tempo	ligeira diminuição da resistência à tração, sem contudo, afetar a compressão.
300 a 500	perda de 20% da resistência à compressão. Perda total da resistência à tração possível.
500	destruição de cal hidratada por perda de água de cristalização
900 a 1000	destruição completa do concreto.

Resalte-se ainda que a variação da resistência do concreto a temperaturas elevadas é função do tipo de concreto. Neville (62) indica que "os concretos mais pobres, aparentemente, sofrem uma menor redução relativa de resistência que os mais ricos", que "a perda de resistência é consideravelmente menor quando o agregado não contiver sílica, por exemplo como calcáreo, rochas ígneas básicas e, particularmente, tijolo fragmentado e escória de alto forno", e que "a condutividade térmica baixa melhora a resistência do concreto ao fogo de modo que, por exemplo, os concretos leves resistem melhor ao fogo do que os normais". Explicita, ainda, a diferença de comportamento quanto à utilização de agregados distintos conforme ilustrado na Figura 5.26.

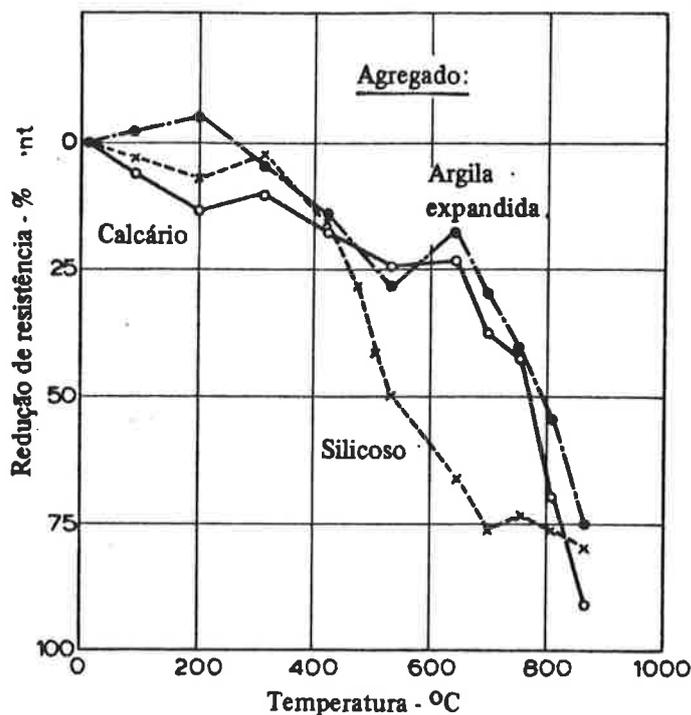


Figura 5.26 - Redução da resistência à compressão de concreto aquecido sem carregamento e ensaiado a quente; resistência média inicial de 28 MPa.

Outro aspecto importante, quanto ao comportamento do concreto, diz respeito à variação do seu módulo de elasticidade. Malhotra (107) cita que ele "é afetado principalmente pelos mesmos fatores que influenciam a resistência à compressão; indica ainda esta variação para dois tipos de concreto, conforme mostrado na Figura 5.27.

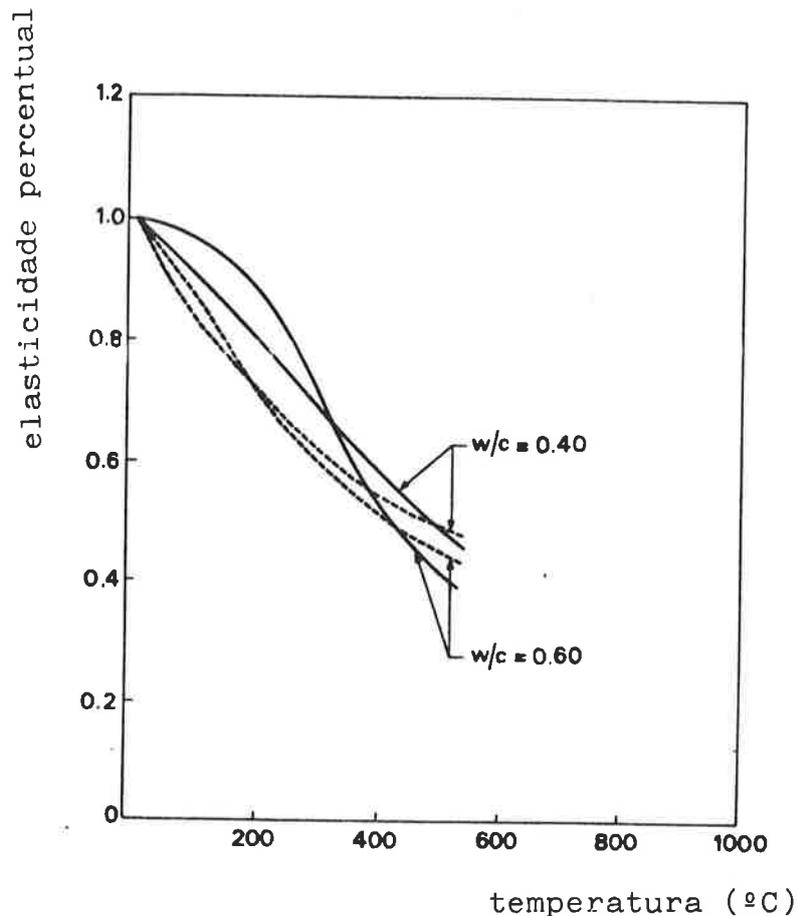


Figura 5.27 - Módulos de elasticidade de concretos de densidade normal, a altas temperaturas, obtidos em ensaios estáticos.

Almeida (117) também ilustra a variação do módulo de elasticidade, conforme pode ser visto na Figura 5.28.

Malhotra (107) diz que "devido à condição transitória de aquecimento tem-se acentuados gradientes de temperatura ao longo da seção, que podem causar danos nos primeiros estágios do fogo". Esses danos referem-se ao lascamento do concreto, ou "spalling", em que, devido às grandes diferenças de temperatura entre as camadas superficiais e as mais profundas, ocorre uma tendência à separação das mesmas através de um "lascamento" do concreto. O autor distingue três tipos de "spalling":

- por rachadura ou estilhaçamento dos agregados;
- por explosão no início do incêndio;
- por enfraquecimento das camadas superficiais devido à exposição prolongada a altas temperaturas.

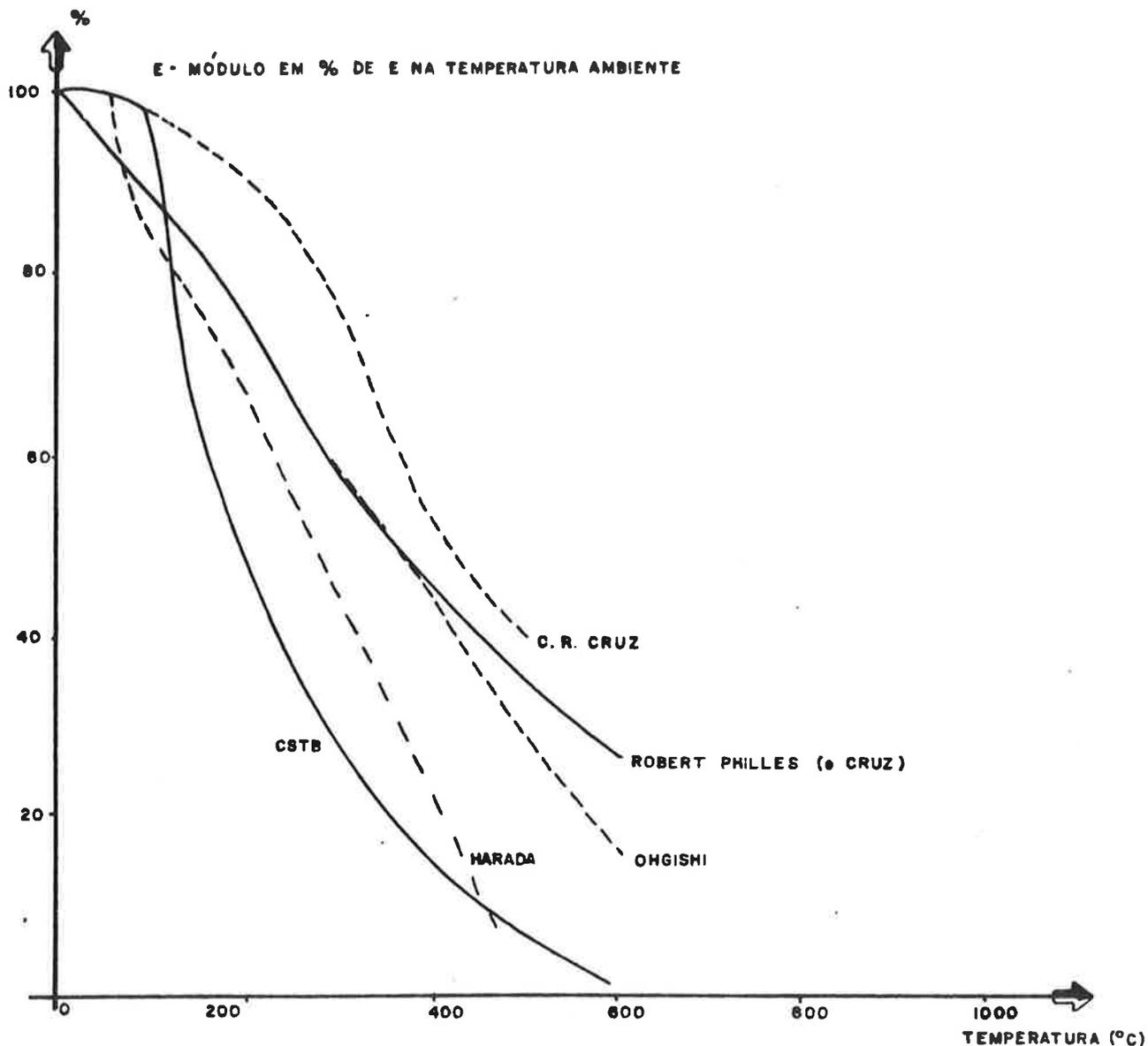


Figura 5.28 - Influência da temperatura no módulo de elasticidade segundo várias pesquisas.

O primeiro caso é típico de concretos feitos com agregados silicosos, em função de mudanças físicas na sua estrutura a altas temperaturas; Landi (100) diz que, no caso de agregados de granito e gnaissas, "a razão fundamental disso é o aumento de volume que o quartzo apresenta ao mudar a sua estrutura cristalina, o que ocorre acima dos 500° C".

O segundo caso, "ainda não totalmente entendido" (107), implica em que pedaços grandes ou pequenos de concreto sejam lançados violentamente, acompanhados de ruído característico. O fenômeno relaciona-se à natureza do agregado, porosidade do concreto, conteúdo de umidade e nível de solicitação do componente.

O terceiro caso se origina no enfraquecimento acentuado das camadas superficiais, que são aquelas mais solicitadas pelas altas temperaturas.

Malhotra (107) cita como medidas preventivas contra este fenômeno:

- o uso de agregados mais favoráveis (calcáreo, agregados leves);
- a utilização de aeradores no concreto;
- adoção de armadura superficial;
- uso de revestimento que minimize os gradientes térmicos gerados.

Quanto aos efeitos relativos às propriedades térmicas do concreto, discute-se a seguir a sua deformação e condutividade térmica. Landi (100) cita que "a maior dificuldade em se propor um modelo matemático da distribuição de temperatura no interior de um elemento estrutural está no fato das propriedades térmicas do concreto variarem com a temperatura".

Indica, este autor, "que os valores da condutibilidade térmica em geral caem da ordem de 1,5 a 1,8 kcal/m x h x °C a 0°C para valores de 0,8 kcal/m x h x °C a 1000°C", variando conforme o tipo de concreto.

Malhotra (107) cita que a condutibilidade do concreto "depende da natureza do agregado, porosidade do concreto e conteúdo de umidade". Chama a atenção para o fato de que, sob a ação do incêndio o conteúdo de umidade é logo perdido, sendo portanto relevante o estudo da variação da condutibilidade do concreto seco no caso do estudo da resistência ao fogo. Apresenta ainda, a variação da condutibilidade com a temperatura para diferentes concretos, conforme a Figura 5.29, onde se pode notar a diferença de comportamento de concreto de densidade normal em relação ao de agregados leves.

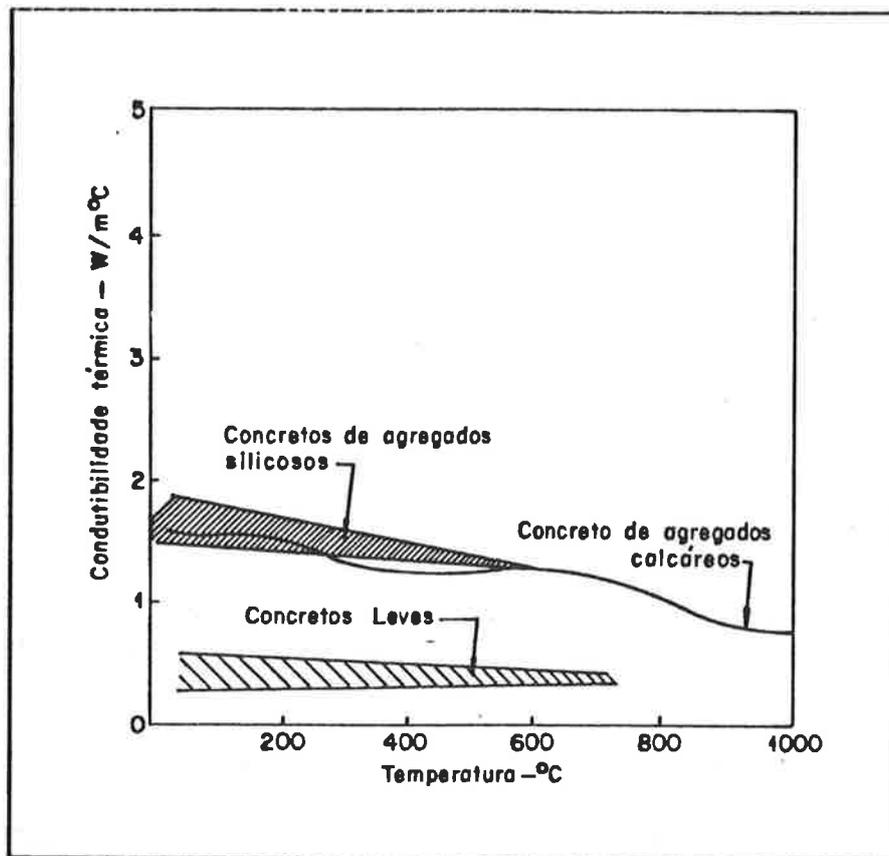


Figura 5.29 - Efeito da temperatura na condutibilidade térmica do concreto.

Quanto à dilatação dos concretos, Almeida (117) diz que "está intimamente ligada à dilatação do agregado". Landi (100) cita que ensaios conduzidos pela "Portland Cement Association" "chamaram a atenção para o fato de o coeficiente linear de dilatação térmica não se manter constante em todas as temperaturas". "Até cerca de 300°C ele apresentou um valor de $7,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; acima dos 450°C ele passou a $22,32 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, sendo esta mudança creditada "à perda de água contida no concreto, inclusive a água de hidratação".

Malhotra (107) comenta que a análise da expansão relacionada unicamente ao aumento da temperatura trata o problema real de uma forma bastante simplificada. Dentro deste contexto ele indica as diferenças de comportamento para concretos com agregados diferentes, conforme a Figura 5.30.

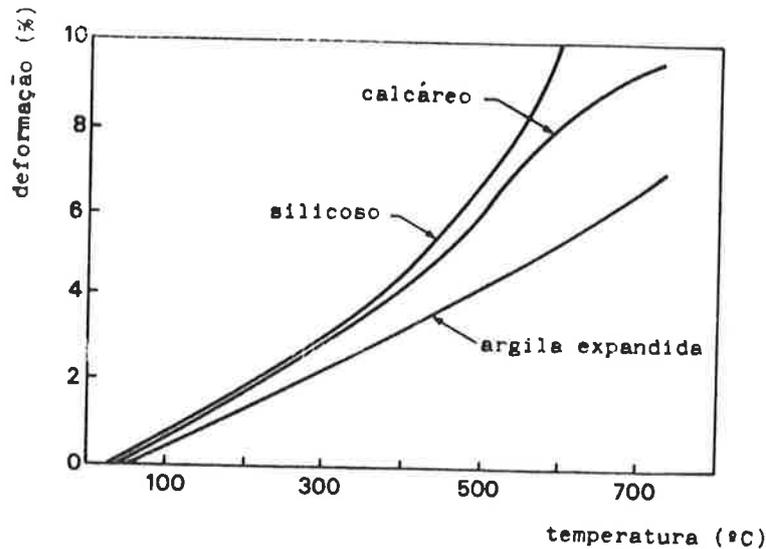


Figura 5.30 - Expansão térmica de concretos produzidos com diferentes agregados.

Cita que trabalhos recentes "têm mostrado que a deformação térmica total de concretos aquecidos consiste de quatro componentes":

- ϵ_1 , deformação térmica medida sem a interveniência de carregamentos externos;
- ϵ_2 , deformação elástica e plástica devida à aplicação de forças externas;
- ϵ_3 , deformação lenta;
- ϵ_4 , deformação provocada pelo aumento da temperatura devido às transformações químicas da pasta.

A deformação líquida medida, num caso real, seria algo semelhante ao indicado na Figura 5.31.

Diz ainda que a deformação térmica depende de alguns fatores, dentre os quais pode-se citar "o tipo de agregado, a velocidade de aquecimento e a intensidade das forças externas aplicadas". Quanto a este último fator, indica o efeito de níveis diferentes de sollicitação externa sobre as deformações medidas num ensaio realizado em um concreto feito com agregados siliciosos, aquecido a uma velocidade de 5°C/min, conforme mostra a Figura 5.32. Note-se o aparecimento de regiões, nas curvas plotadas, onde a deformação tende a crescer indefinidamente, o que configura uma temperatura crítica quanto à estabilidade do componente.

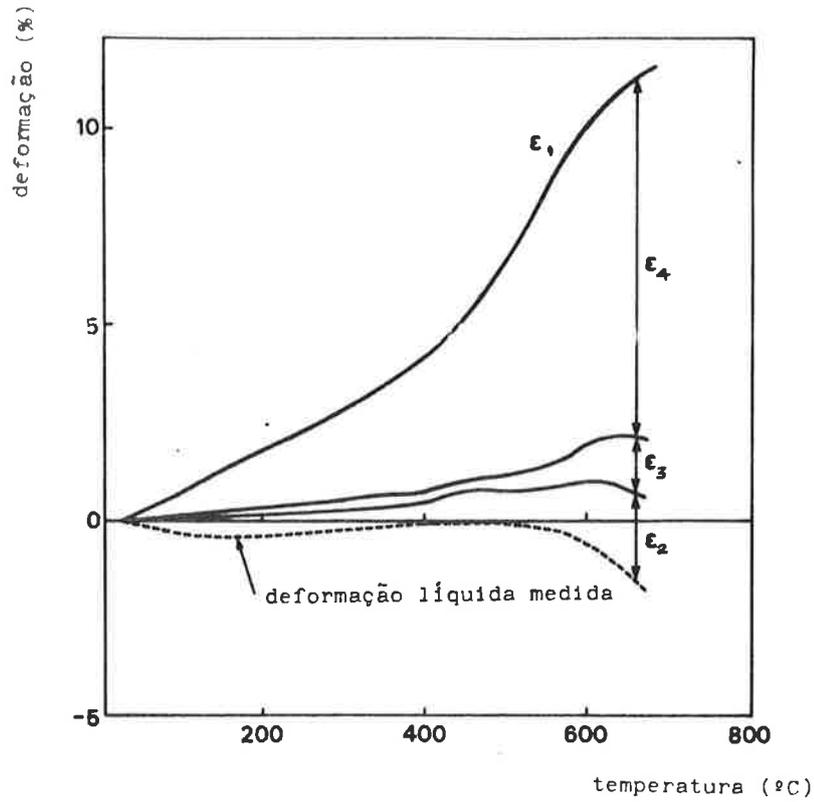


Figura 5.31 - Diferentes componentes da deformação térmica.

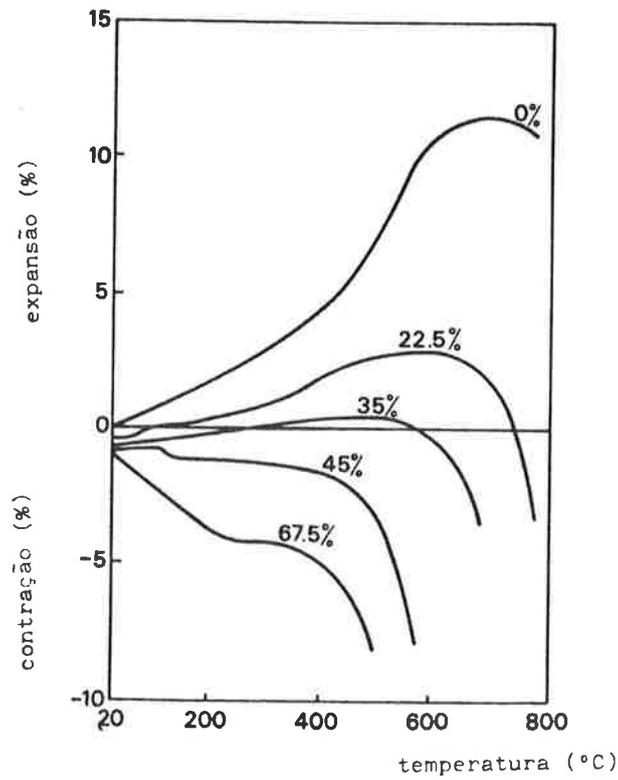


Figura 5.32 - Deformação térmica para diferentes condições de carregamento.

5.2.2.1.3 A Interação Aço-Concreto

Quanto à resistência mecânica mostrou-se que ambos os materiais são afetados significativamente se aquecidos a altas temperaturas.

Por exemplo, determina-se a partir da Tabela 5.10 que, a 500°C, a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade do aço caem respectivamente a 50,0% e a 57,3% dos valores obtidos a 20°C. A partir da Figura 5.24 e da Figura 5.27 obtém-se também para 500°C os valores dessas mesmas grandezas para o concreto como sendo, em média, 50% dos valores à temperatura ambiente.

No entanto, apesar da mesma susceptibilidade às altas temperaturas por parte dos materiais aço e concreto, quando utilizados na laje composta e submetidos a um incêndio eles não se aquecem na mesma velocidade, seja em função de sua posição em relação ao fogo ou seja, principalmente, em função da grande diferença de condutibilidade térmica destes materiais: citou-se que Malhotra (107) indicou uma condutibilidade térmica para o aço vinte e cinco vezes maior que a do concreto a temperaturas ambientes.

Assim é que, "se a condutividade do aço é alta o suficiente para poder-se assumir uma uniformidade de temperatura ao longo de uma seção de dimensões normais" (107), o mesmo não ocorre com o concreto, conforme se verifica através da Figura 5.33, obtida por pesquisadores do "National Institute for Materials Testing" (100), que submeteram uma viga de concreto protendido a exposições sob fogo normalizado medindo as temperaturas alcançadas ao longo da mesma.

Assim é que a perda de resistência da chapa de aço é acentuadamente maior que a perda global do concreto.

Esta diferença de condutibilidade mantém-se para temperaturas elevadas; o coeficiente de condutibilidade térmica do aço a 500°C, conforme a Figura 5.22, cai a pouco menos de 40 W/m°C, enquanto a do concreto de densidade normal reduz-se aproximadamente a 1,5 W/m°C (Figura 5.29), mantendo, portanto, uma relação próxima à verificada a temperaturas ambientes.

Quanto ao coeficiente linear de expansão térmica, se para o aço ele mantém-se praticamente constante com o aumento da temperatura (Figuras 5.19 e 5.21) em torno do valor de 14×10^{-6} m/m °C, citou-se uma alteração para o concreto, que apresentaria um valor de $7,6 \times 10^{-6}$ m/m°C para temperaturas de até 300°C e de 22,32 m/m°C para temperaturas acima de 450°C.

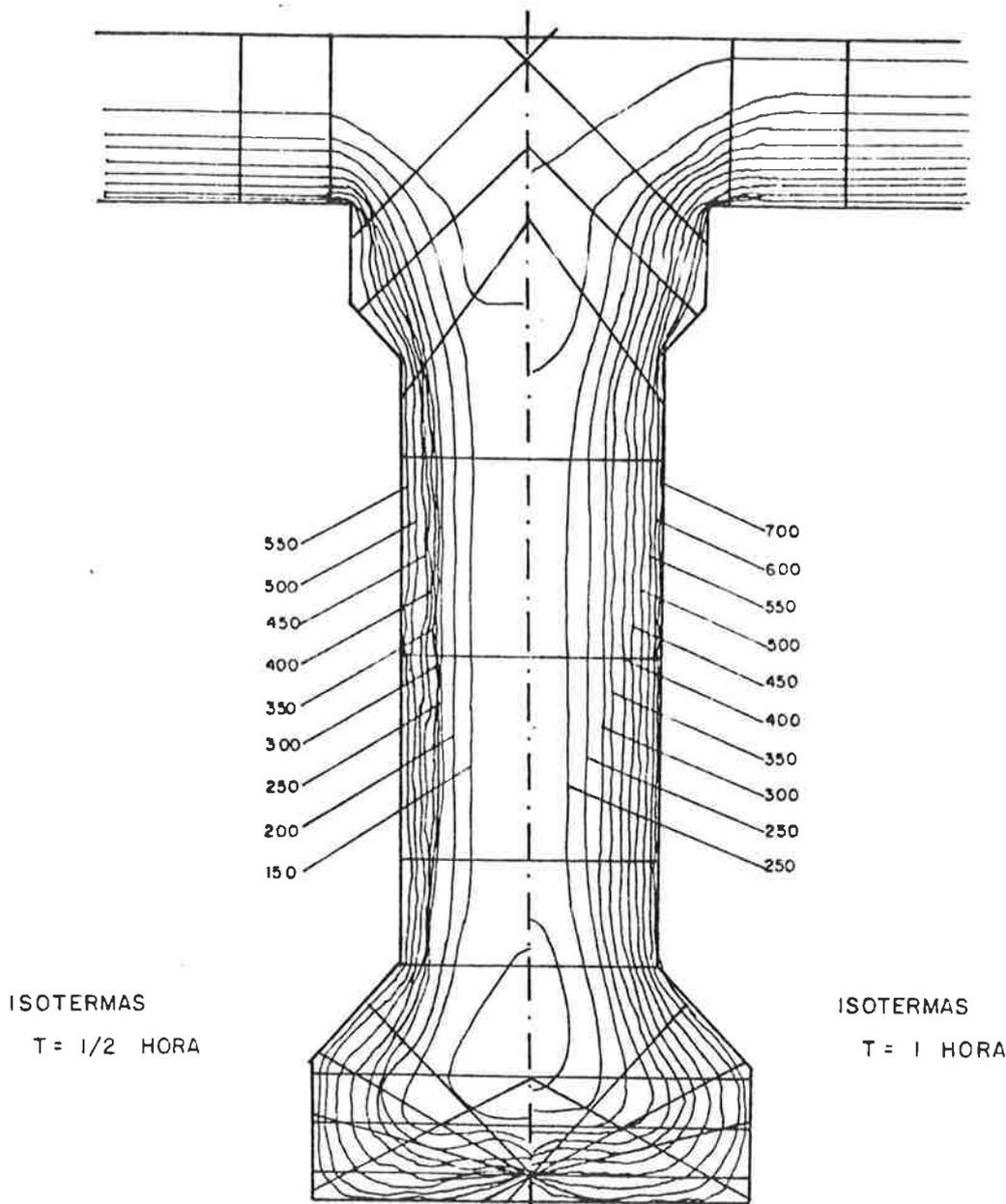


Figura 5.33 - Curvas isotérmicas ao longo da seção de uma viga de concreto protendido para 1/2 e 1 hora de submissão ao fogo normalizado.

Nota-se também que os coeficientes apresentam valores de mesma ordem de grandeza, sendo as diferenças de alongamento durante um incêndio novamente creditadas às diferentes velocidades de aquecimento dos materiais.

Do que foi exposto é de se esperar um alongamento diferenciado da chapa em relação ao concreto, o que pode gerar a tendência de destacamento de um em relação ao outro.

Newman e Walker (118) citam que "durante um incêndio, a chapa dobrada de aço se aquece rapidamente, expande, e normalmente se separa do concreto".

Se por um lado este fenômeno reduz a resistência do componente, na medida em que prejudica o trabalho solidário, por outro a existência da chapa de aço é importante na prevenção da ocorrência do anteriormente citado "spalling" do concreto, sob qualquer uma de suas formas de ocorrência.

Em função disto Newman e Walker (118) comentam que "é normal, embora conservativo, assumir que a chapa não contribui para a resistência ao fogo". Acrescentam ainda que, apesar de sua não consideração, a chapa atua favoravelmente em relação aos três aspectos analisados quando da definição de resistência ao fogo de um componente:

- isolamento térmico - "atua como um escudo reduzindo o fluxo de calor para o concreto";
- manutenção da integridade - "previne a passagem de chamas e gases quentes" e "auxilia no controle e contenção do "spalling" do concreto";
- manutenção da estabilidade - mesmo arqueada, mantém ainda uma "certa capacidade para suportar os carregamentos, trabalhando tracionada".

5.2.2.2 A Concepção Influenciando a Resistência ao Fogo

No projeto das lajes compostas vários caminhos podem ser adotados no sentido de se conseguir componentes com resistência ao fogo adequada. Entre estes pode-se citar: a adoção de perfis com geometria favorável, a concepção de esquemas estruturais que favoreçam o desempenho frente ao fogo, a utilização de armadura complementar na forma de barras, bem como a associação da laje a materiais de proteção adequados.

Discute-se, a seguir, alguns aspectos relevantes que podem servir de subsídio para a concepção de lajes compostas seguras quanto ao incêndio.

5.2.2.2.1 Superfície Específica da Chapa de Aço

A combustão dos materiais, no caso de um incêndio em um compartimento, provoca o surgimento de chamas bem como o aquecimento dos gases existentes no local. A laje composta, e em particular a chapa de aço dobrada situada na sua face inferior, vai receber uma parte do calor gerado no fenômeno.

Esta energia transfere-se em um regime variável, que se estabelece tanto em função da variação da temperatura associada ao ambiente do incêndio, quanto da variação das propriedades térmicas dos materiais que constituem a laje.

Estudando-se a chapa de aço (Figura 5.34) isoladamente, com a hipótese de uniformidade da temperatura ao longo da mesma a cada instante, bem como considerando-se um intervalo infinitesimal de tempo "dt", pode-se descrever a quantidade de calor transferida para o componente através da seguinte expressão simplificada:

$$Q = \alpha \cdot A_c (T_m - T_c) \cdot dt \quad (5.18)$$

onde:

- Q = quantidade de calor transferido à chapa;
- α = coeficiente global de transferência de calor;
- A_c = área exposta ao fogo;
- T_m = temperatura do meio ambiente sob a chapa;
- T_c = temperatura da chapa.

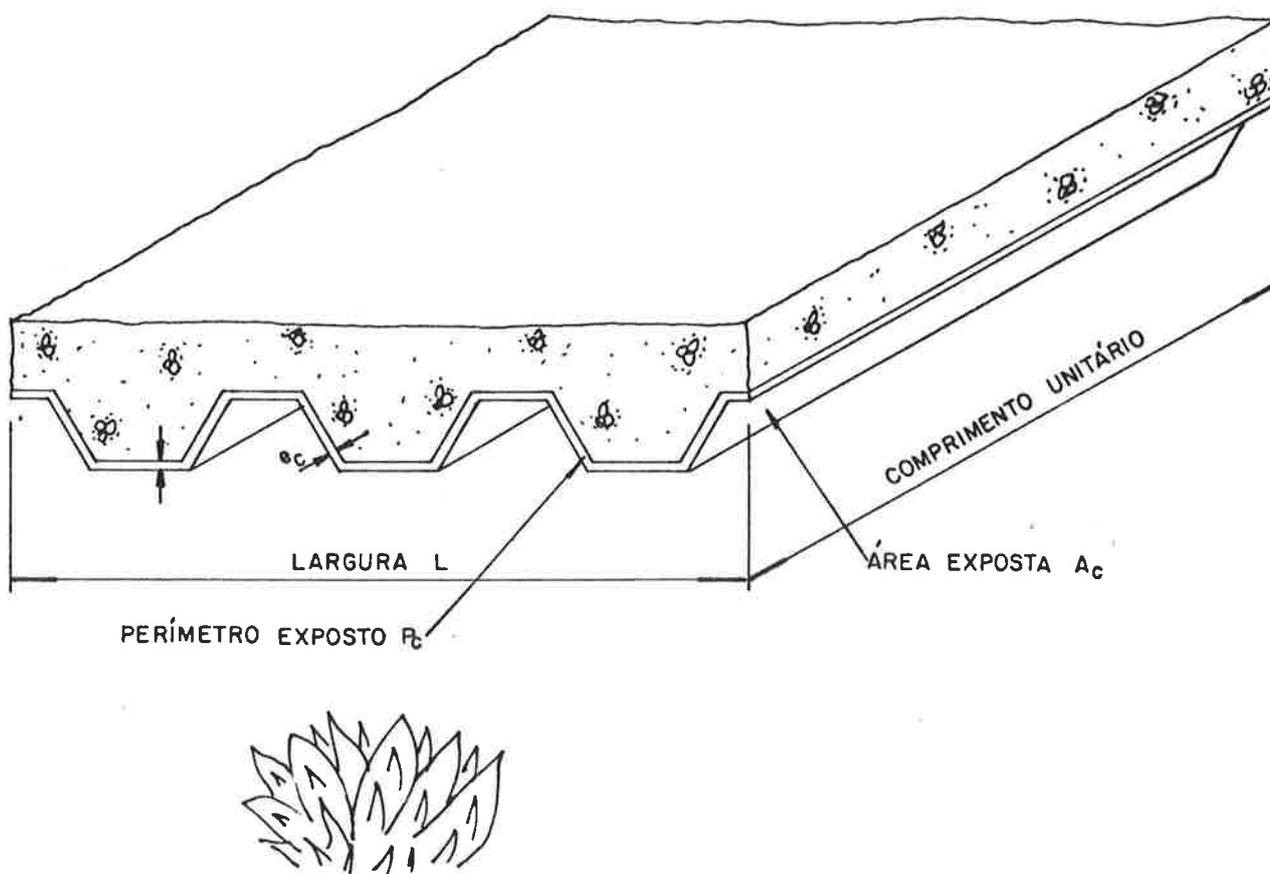


Figura 5.34 - Representação esquemática do componente em estudo.

Este calor recebido pela chapa vai provocar uma elevação de sua temperatura, tal que:

$$Q = m_c \cdot c_m \cdot \Delta T_c \quad (5.19)$$

onde:

m_c = massa da chapa;
 c_m = calor específico do aço;
 ΔT_c = variação da temperatura da chapa.

Igualando as duas expressões citadas, pode-se expressar a variação de temperatura como:

$$\Delta T = \frac{\alpha}{c_m} \cdot \frac{A_c}{m_c} (T_m - T_c) \cdot dt \quad (5.20)$$

Observando-se que, tratando-se de um componente de comprimento unitário, tem-se:

$$A_c = P_c \cdot 1 \cdot e_c \quad (5.21)$$

onde:

e_c = espessura da chapa

Mais que isto:

$$m_c = S_c \cdot 1 \cdot \rho_m \quad (5.22)$$

onde:

S_c = área da seção transversal da chapa;
 ρ_m = massa específica do aço.

Portanto, chega-se a:

$$T = \frac{P_c}{c_m} \cdot \frac{1}{A_c} \cdot \frac{1}{\rho_m} (T_m - T_c) dt \quad (5.23)$$

Da expressão acima pode-se extrair o denominado "fator de forma" da chapa P_c/A_c ; para um mesmo incêndio, portanto, quanto maior o valor deste fator maior a elevação da temperatura da chapa. Dizendo o mesmo de outra maneira, para componentes de mesmo peso de aço (ou área da seção transversal) por metro linear, aquele que possuir menor perímetro sofrerá menor elevação de temperatura, possuindo desempenho superior ao fogo.

Um exemplo desta constatação pode ser visto na Figura 5.35, onde dois componentes com a mesma área de seção para uma largura fixa possuem diferentes fatores de forma.

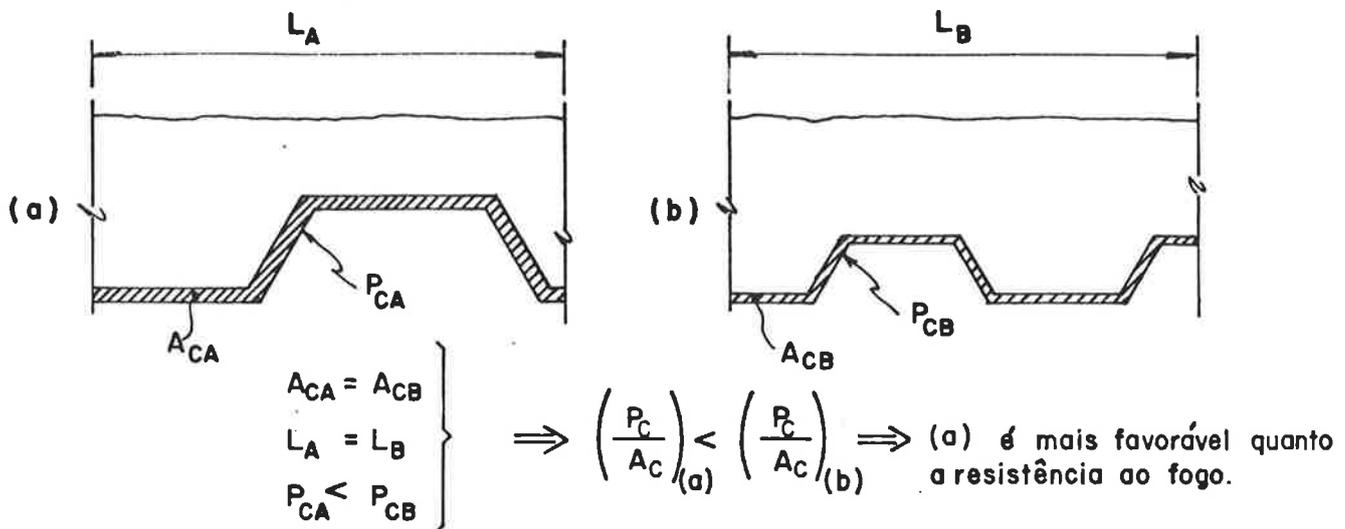


Figura 5.35 - Comparação de geometrias distintas de chapas de aço dobradas usadas para lajes compostas.

Adotando o metro como unidade de comprimento, Malhotra (107) cita que para fatores de forma superiores a 300, a elevação da temperatura do componente de aço processa-se praticamente instantaneamente a partir da elevação da temperatura do meio; as chapas dobradas com 1 mm de espessura possuem fator de forma igual a 1000, o que reforça a noção de sua sensibilidade à ação da temperatura.

5.2.2.2.2 Geometria da Seção Transversal e Tipo de Concreto Utilizado

Além do "fator de forma" citado, o próprio "desenho" da seção transversal da chapa dobrada tem influência quanto ao seu desempenho em relação ao fogo.

Os perfis do tipo "rabo-de-andorinha" são mais favoráveis que os "trapezoidais" (Figura 5.36); "as nervuras oferecem uma certa ancoragem mecânica no concreto" (28), o que dificulta o seu destacamento, garantindo a existência de um trabalho solidário aço-concreto por um período de tempo maior.

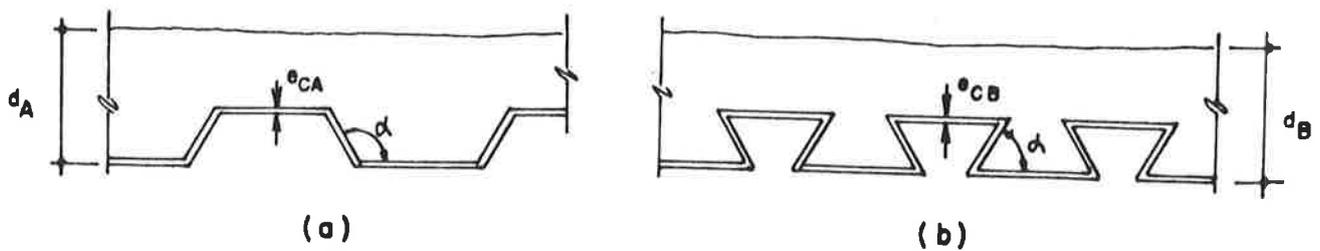


Figura 5.36 - Perfis de chapa de aço dobrada para lajes compostas: a) "trapezoidal"; b) "rabo-de-andorinha".

O CIRIAC ("Construction Industry Research and Information Association") apresenta resultados que demonstram a observação acima (28); por exemplo, para se obter uma laje com 1 hora de resistência ao fogo a partir dos perfis ilustrados na Figura 5.36, com $e_{CA} = e_{CB} = 0,9$ mm e distância entre apoios de 3 m, necessitar-se-ia de uma altura total de concreto $d_A = 13$ cm e $d_B = 12$ cm, o que mostra o melhor desempenho do perfil "rabo-de-andorinha".

Por outro lado, a observação da Figura 5.33 dá indicações de que as partes mais quentes são os ângulos salientes ou, de outra maneira, que a adoção de ângulos mais abertos diminuiria o gradiente de temperatura nas proximidades do vértice deste. Esta constatação vem no sentido de atenuar um pouco os benefícios citados para o perfil "rabo-de-andorinha" sendo que, no entanto, como resultado geral e com base em resultados experimentais de outros países, cita-se ainda o melhor desempenho deste.

Quanto ao concreto, viu-se anteriormente que o tipo de material adotado tem influência na variação de propriedades relevantes do mesmo em relação à temperatura. Em particular, a adoção de concretos leves, no que tange à transmissão de calor, mostra-se bastante favorável.

Relembre-se que, na definição de componente resistente ao fogo, um dos três aspectos analisados diz respeito à isolamento térmico; para que a laje garanta uma isolamento adequada entre o ambiente em chamas e o contíguo há que se prever uma adequada espessura de concreto. Nas prescrições apresentadas por Newman e Walker (118), conforme indicado nas Tabelas 5.12 e 5.13, evidencia-se o melhor desempenho do concreto leve quanto a proporcionar um isolamento térmico adequado; a comparação entre as duas tabelas reafirma o comentário anterior a respeito do "desenho" do perfil.

Tabela 5.12 - Espessura mínima de concreto (mm) sobre as nervuras para propiciar isolamento térmico adequado no caso de perfis "trapezoidais".

Resistência ao fogo	1/2 h	1 h	1 1/2 h	2 h	3 h	4 h
concreto densidade normal	65	90	105	115	135	150
concreto leve	55	65	75	85	115	130

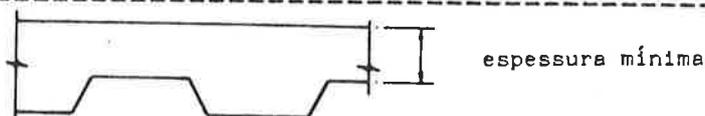
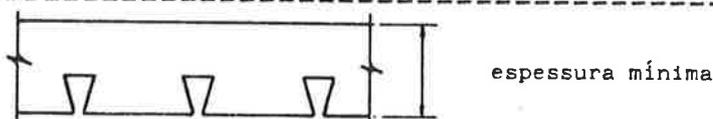


Tabela 5.13 - Espessura total mínima de concreto para propiciar isolamento térmico adequado no caso de perfis "rabo-de-andorinha".

Resistência ao fogo	1/2 h	1 h	1 1/2 h	2 h	3 h	4 h
concreto densidade normal	90	90	110	125	150	170
concreto leve	90	90	105	115	135	150



Malhotra (107) descreve também a menor velocidade de elevação da temperatura numa laje de concreto leve, conforme Figura 5.37

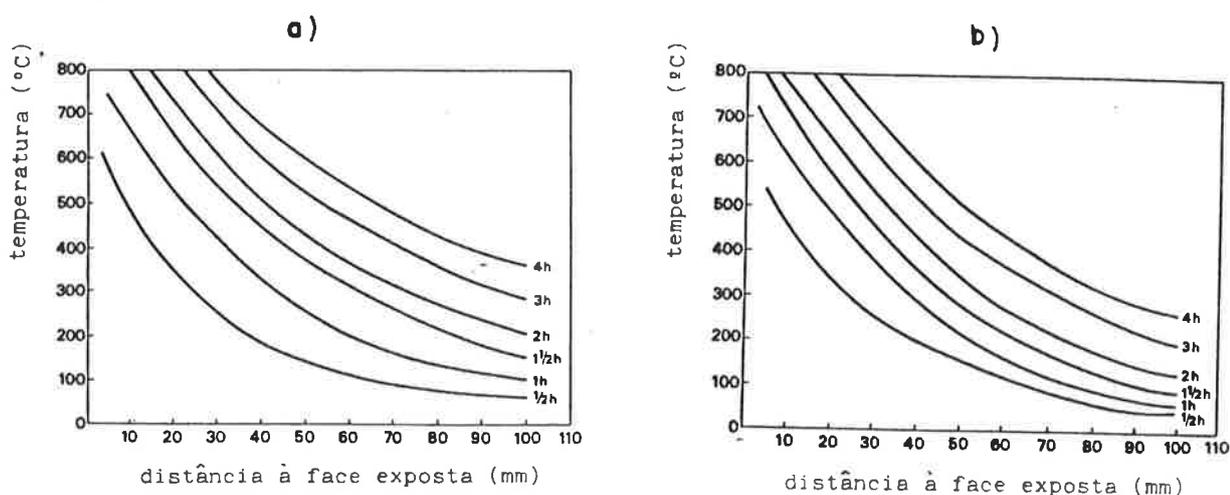


Figura 5.37 - Transferência de calor em lajes: a) concreto de densidade normal; b) concreto leve.

O concreto leve favorece também a atenuação da queda da resistência do concreto com a elevação de temperatura, bem como retarda o aquecimento de eventuais armaduras adicionais, na forma de barras de aço, posicionadas no interior da laje, o que otimiza a resistência ao fogo deste componente.

5.2.2.2.3 Esquema Estático

"As estruturas hiperestáticas reagem mais favoravelmente, em face da deformação que mobiliza esforços, os quais compensam, parcialmente, as ações decorrentes do efeito do fogo" (117).

Acrescente-se à afirmação acima que "no caso de sistemas estaticamente determinados, a formação de uma única rótula no ponto de maior solicitação pode levar à ruína, já que a seção é incapaz de oferecer resistência à rotação", o que não ocorre com os sistemas estaticamente indeterminados onde "mais de uma rótula é necessária para propiciar um mecanismo de ruptura" (107), conforme mostrado na Figura 5.38.

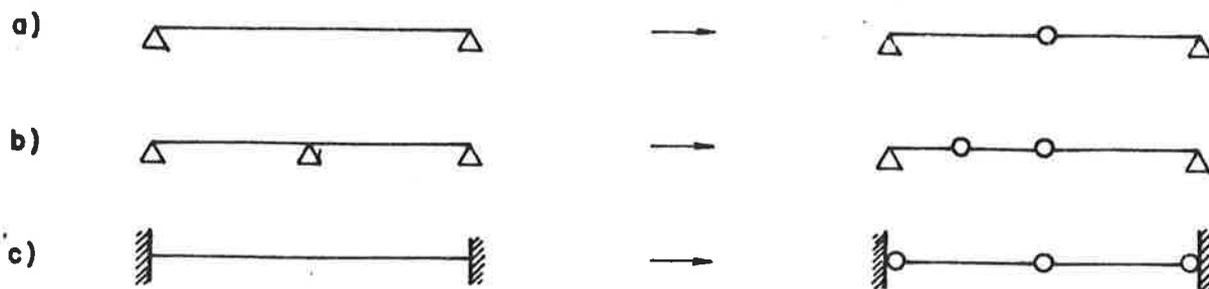
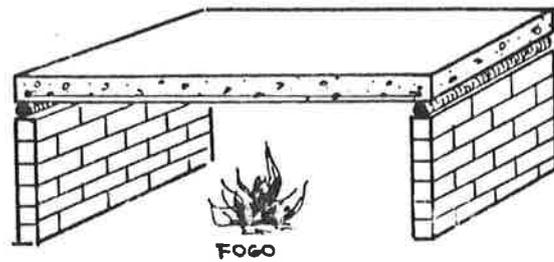


Figura 5.38 - Formação de rótulas plásticas em componentes submetidos à flexão: a) simplesmente apoiado; b) contínuo; c) bi-engastado.

Assim é que a adoção de continuidade para as lajes leva a um melhor desempenho das mesmas.

Almeida (117) cita que uma laje simplesmente apoiada submetida ao fogo (Figura 5.39-a), sem restrições à rotação ou à deformação, apresenta um comportamento conforme ilustrado na Figura 5.39-b.

a)



b)

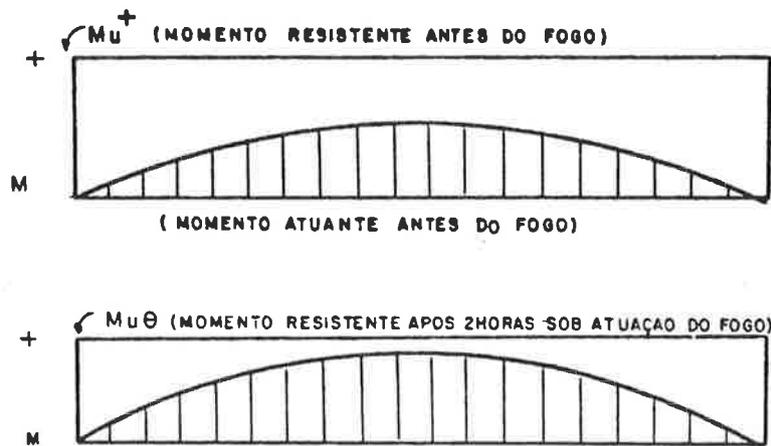
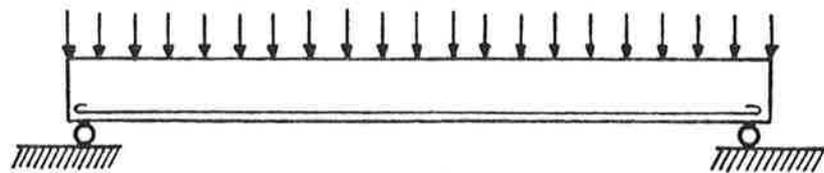


Figura 5.39 - Comportamento de laje bi-apoiada submetida ao fogo: a) descrição simplificada; b) diagramas de momentos atuantes e resistentes, antes e durante o incêndio.

Considerando-se uma uniformidade na elevação da temperatura ao longo de todo o pano de laje, sua capacidade resistente reduz-se também uniformemente, enquanto a solicitação pode ser considerada constante, desprezando-se o consumo dos materiais pelo fogo (exemplo: luminárias penduradas, revestimento do forro). A maior temperatura da face inferior

em relação à superior levará a uma maior dilatação daquela, com a conseqüente curvatura da laje convexamente em direção ao fogo.

No caso de uma laje contínua a situação pode ser bastante mais favorável. O maior aquecimento da face inferior, levará à tendência de um maior alongamento desta com relação à face superior; no entanto, em função das restrições agora existentes nos apoios intermediários quanto à dilatação da laje, surge uma tendência ao levantamento destes. Todo este contexto vai gerar um acréscimo nos momentos negativos na região dos apoios intermediários e uma redução dos momentos solicitantes positivos na região central dos vãos.

Há que se considerar finalmente que a temperatura próxima à face superior é menor que próximo à face inferior, o que implica em minimizar a redução da resistência das barras de aço utilizadas como armadura negativa nos apoios. O aumento da solicitação acontece, portanto, numa região em que a redução da capacidade resistente é atenuada.

A Figura 5.40 indica qualitativamente o transcorrer do fenômeno em uma laje contínua de três apoios.

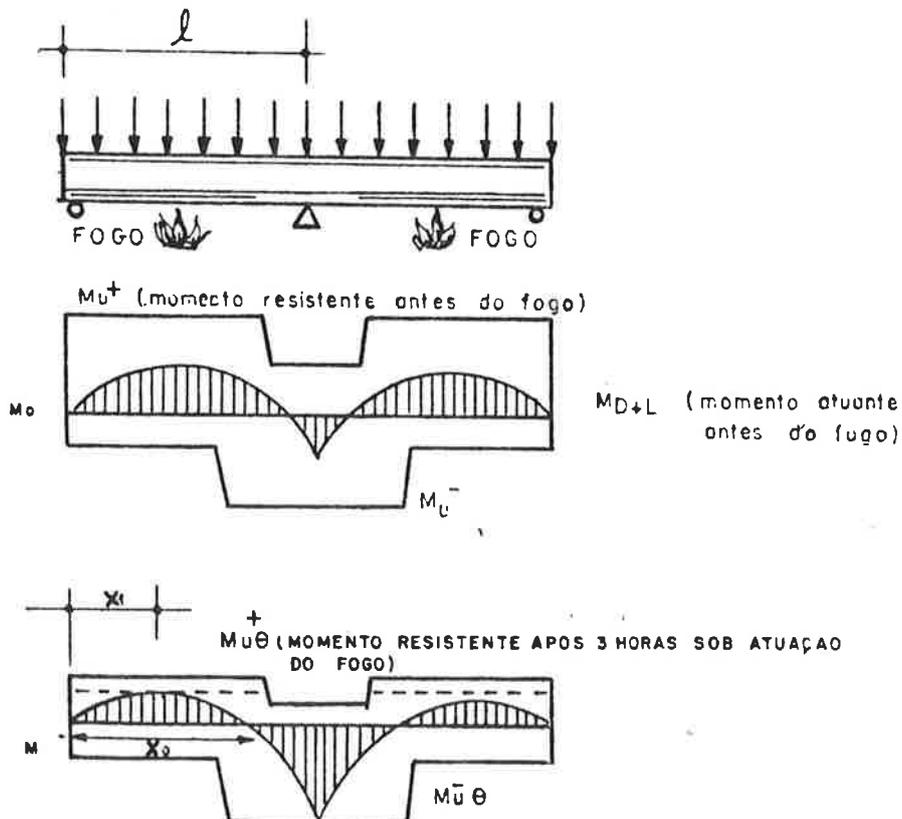


Figura 5.40 - Diagramas de momentos atuantes e resistentes, para laje contínua de três apoios, durante a ocorrência de um incêndio.

Para o incêndio ocorrendo no compartimento sob um tramo intermediário de uma laje contínua, as extremidades da mesma propiciariam um certo engastamento, levando a um comportamento semelhante ao descrito.

Na descrição de lajes resistentes ao fogo a ser feita no item 5.2.2.3, o melhor desempenho das lajes hiperestáticas poderá ser checado através dos resultados experimentais mostrados.

Mesmo no caso de lajes bi-apoiadas, "quando uma armadura negativa é colocada sobre os apoios para controle de fissuração, isto aumenta a resistência ao fogo desde que se garanta uma adequada capacidade de rotação da laje na região do apoio. Isto depende da qualidade do aço e do comprimento da armadura" (28). Enquanto os japoneses (13) exigem que esta armadura se estenda no mínimo 30 cm além da face lateral da viga, Almeida (117) indica que 20% da armadura negativa deve se estender por todo o vão.

5.2.2.2.4 Armaduras Complementares

A adoção de armaduras adicionais, na forma de barras de aço ou telas eletrossoldadas, pode advir da necessidade de se contrabalançar a perda de resistência mecânica da chapa de aço devida ao fogo.

Viu-se que o aço, submetido a temperaturas elevadas, perde muito de sua capacidade resistente; as barras de aço, imersas no concreto da laje composta, não estariam submetidas à mesma elevação de temperatura verificada para a chapa, o que lhes propicia um melhor desempenho no caso da ocorrência de incêndio.

Quanto à localização desta armadura dentro do componente, deve-se analisar uma solução de compromisso entre uma posição mais eficiente quanto ao funcionamento à flexão e outra quanto ao isolamento térmico (Figura 5.41).



Figura 5.41 - Posicionamento de armadura para aumentar a resistência ao fogo.

Newman e Walker (118) indicam possibilidades para o posicionamento de telas eletrossoldadas para o caso de lajes compostas simplesmente apoiadas e contínuas (Figura 5.42). Note-se que no caso de se adotar uma única camada de tela para armar a laje contínua, há que se proceder a uma "ondulação" da mesma para localá-la nas posições mais eficientes.

Cabe salientar que, no dimensionamento das lajes compostas, muitas vezes o fator limitante do cálculo dá-se na etapa de execução da laje, isto é, quando somente a chapa é o material resistente. Como consequência, no funcionamento solidário aço-concreto, tem-se uma reserva de resistência da chapa de aço que não é utilizada nas condições normais de carregamento. Assim é que, de certa forma, tem-se já de início uma quantidade de "armadura adicional".

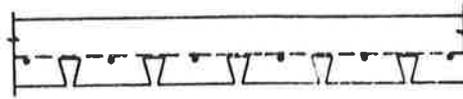
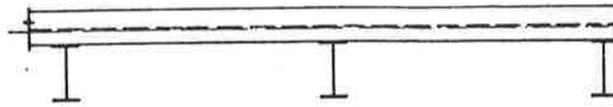
No entanto, há que se considerar o fato já comentado do destacamento da chapa em relação ao concreto quando do aquecimento; Newman e Walker (118) descrevem um procedimento para verificação da resistência ao fogo de lajes compostas tendo em mente que "é normal, porém conservativo, assumir que a chapa não contribui para a resistência ao fogo".

O método proposto trata-se de uma verificação da resistência ao fogo de lajes compostas através de cálculo, constituindo-se em uma alternativa em relação à realização de ensaios em fornos. Citam os autores que os resultados finais "são conservativos em comparação com os métodos de construção usados nos EUA e no Canadá". Despreza-se, de início, qualquer resistência adicional propiciada pela chapa de aço; a resistência ao fogo requerida tem de ser conseguida por meio do concreto e de armaduras adicionais na forma de barras, que não precisam necessariamente constituir-se em "reforço adicional colocado na laje puramente para receber carga quando do incêndio, podendo-se considerar qualquer armadura presente em função dos critérios de projeto".

Para a consecução de um efetivo isolamento térmico, Newman e Walker (118) exigem que a espessura de concreto utilizada esteja de acordo com as já citadas nas Tabelas 5.12 e 5.13.

Garantida a condição de isolamento térmico, considera-se que a integridade é garantida pela existência de chapa dobrada adequadamente associada ao concreto. Resta portanto, fazer a verificação da estabilidade da laje sob a ação do fogo; considera-se ainda que "é suficiente demonstrar que a laje de piso possui resistência adequada, constituindo-se a limitação da deformação um parâmetro inadequado" (118). Os autores citam que, no caso dos ensaios em fornos, a limitação da flecha é "definida em função de se garantir uma segurança dos equipamentos em relação a uma ruptura real do componente e não em função de quaisquer considerações estruturais" (118).

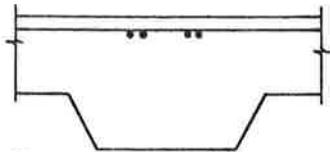
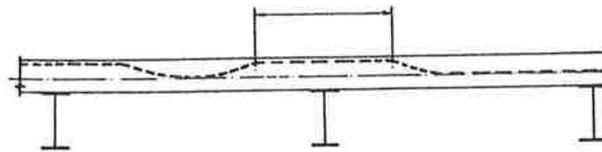
a)



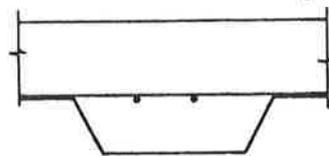
seção transversal típica

b)

ondulação da tela

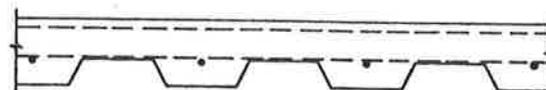
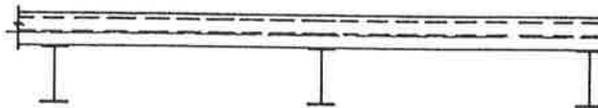


seção no apoio intermediário



seção no meio do vão

c)



seção transversal típica

Figura 5.42 - A utilização de telas de aço eletrossoldadas como armaduras adicionais para lajes compostas: a) laje simplesmente apoiada; b) laje contínua utilizando uma única camada de tela adequadamente conformada; c) laje contínua utilizando duas camadas de tela.

O procedimento principia pela estimativa das temperaturas alcançadas pelo concreto e pelas barras de aço, após um período de tempo igual à resistência ao fogo requerida; reduz-se, então, a resistência mecânica destes em função do aquecimento ocorrido, procedendo-se à determinação da capacidade resistente da laje neste instante. Este valor é, finalmente, comparado à solicitação da laje, obtida a partir da adoção de coeficientes de majoração de carga e de minoração de resistência que podem diferir um pouco dos adotados para o dimensionamento da laje na situação de utilização normal.

Para a determinação das temperaturas através da laje adotam-se os valores fornecidos na Tabela 5.14; note-se, na Figura 5.43, como deve ser medida a profundidade interna à laje.

Tabela 5.14 - Distribuição de temperaturas (°C) através da laje.

Profundidade	Resistência ao Fogo (h)											
	1/2		1		1 1/2		2		3		4	
	NW	LW	NW	LW	NW	LW	NW	LW	NW	LW	NW	LW
10	470	460	650	620	790	720	1880	770	*	*	*	*
20	340	330	530	480	650	580	1720	640	*	740	*	*
30	250	260	420	380	540	460	1610	530	700	630	770	700
40	180	200	330	290	430	360	1510	430	600	520	670	600
50	140	160	250	220	370	280	1440	340	520	430	600	510
60	110	130	200	170	310	230	1370	280	460	380	540	440
70	90	80	170	130	260	170	1320	220	410	320	480	380
80	80	60	140	80	220	130	1270	180	360	270	430	320
90	70	40	120	70	180	100	1240	150	320	230	380	280
100	60	40	100	60	160	80	1210	140	280	190	360	270

NW = concreto de densidade normal
LW = concreto leve

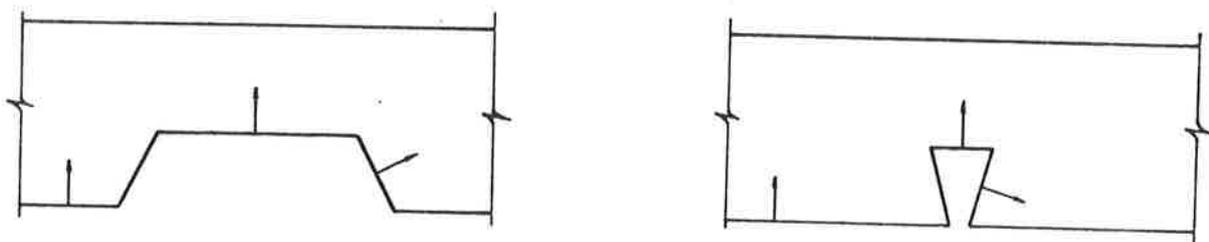


Figura 5.43 - Medição da profundidade de um ponto interno à laje.

Tendo-se a posição da armadura define-se, pois, sua temperatura e, a partir dos valores listados na Tabela 5.15, pode-se estimar a redução de resistência correspondente, através do denominado coeficiente de redução térmico "Kr".

Tabela 5.15 - Coeficiente de redução térmico "Kr".

Temp °C	Armadura	Concreto Normal	Concreto Leve
Até 30°C sem redução			
300	1,00	1,00	1,00
350	0,91	1,00	1,00
400	0,81	0,91	1,00
450	0,72	0,82	1,00
500	0,62	0,73	1,00
550	0,53	0,64	0,90
600	0,43	0,55	0,80
650	0,34	0,46	0,70
700	0,24	0,37	0,60

Para se proceder à verificação, baseada nos princípios de estado limite último, os autores adotam os seguintes "coeficientes parciais", definidos na publicação "Design and detailing of concrete structures for fire resistance", do "Instituto dos Engenheiros Estruturais de Londres":

- majoração dos carregamentos:

- . carga permanente: $\gamma_1 = 1,05$
- . carga acidental: $\gamma_2 = 1,00$

- minoração da resistência dos materiais:

- . armadura: $\gamma_s = 1,00$
- . concreto: $\gamma_c = 1,30$

5.2.2.2.5 Utilização de Materiais de Proteção

A adoção de revestimentos ou "encapsulamentos" dos componentes estruturais, visando aumentar sua resistência ao fogo, começou fazendo uso dos materiais e técnicas já existentes, como por exemplo a execução de alvenarias contornando pilares ou a concretagem envolvente das vigas de aço (Figura 5.44).

No estágio atual, além destes procedimentos tradicionais, pode-se fazer uso de materiais especialmente desenvolvidos para cumprir esta função.

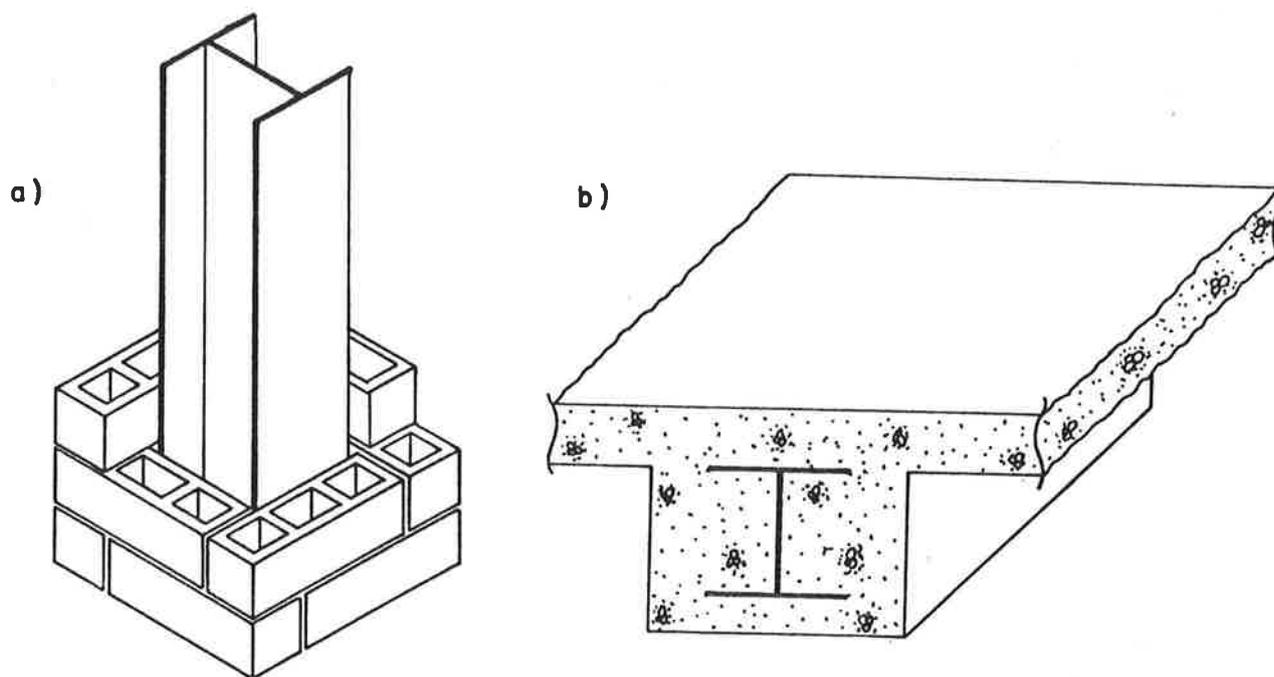


Figura 5.44 - A proteção por encapsulamento convencional: a) contorno de pilar com alvenaria; b) viga envolvida por concreto.

Dois aspectos são essenciais para o desempenho destes materiais: ser bom isolante térmico a altas temperaturas e manter-se íntegro durante o desenvolvimento do incêndio. O primeiro aspecto diz respeito à diminuição do acesso de calor ao aço, sendo importantíssimo a manutenção das propriedades isolantes a altas temperaturas; o poliestireno expandido ("isopor") é um ótimo isolante a baixas temperaturas, não podendo, no entanto, ser usado para proteção contra fogo. Quanto ao segundo aspecto, o aparecimento de fissuras, o deslocamento ou ruína da proteção, seja por dilatações excessivas, por perda de aderência ou mesmo choque térmico, pode comprometer acentuadamente a segurança.

Dentro deste contexto, são propriedades desejáveis dos materiais para proteção das estruturas de aço contra incêndios: baixa densidade ou massa específica aparente (d), baixo coeficiente de condutibilidade térmica (k), alta capacidade de absorção de calor, resistência a choques térmicos, coeficiente de dilatação térmica semelhante ao do aço, estabilidade dimensional, resistência mecânica e coesão.

Essas várias propriedades têm importância relativa distinta em função de cada aplicação, fato que deve ser observado na escolha do material adequado para cada caso.

Passa-se, a seguir, a uma classificação e descrição dos materiais de proteção de uma forma genérica, sem a preocupação de sua aplicação à laje composta, o que será tratado em detalhes no item 5.3.

5.2.2.2.5.1 Classificação do revestimento

A sub-divisão dos sistemas de proteção pode ser conseguida por vários caminhos, como por exemplo: segundo o material constituinte, a morfologia do revestimento ou a técnica executiva.

Quanto ao material pode-se citar: concreto de cimento Portland, concretos leves, argamassa de cimento e vermiculita, gesso, componentes cerâmicos, etc.

Quanto à morfologia pode-se classificar as aplicações em revestimentos tipo "caixa" ou tipo "contorno", conforme indicado na Figura 5.45.

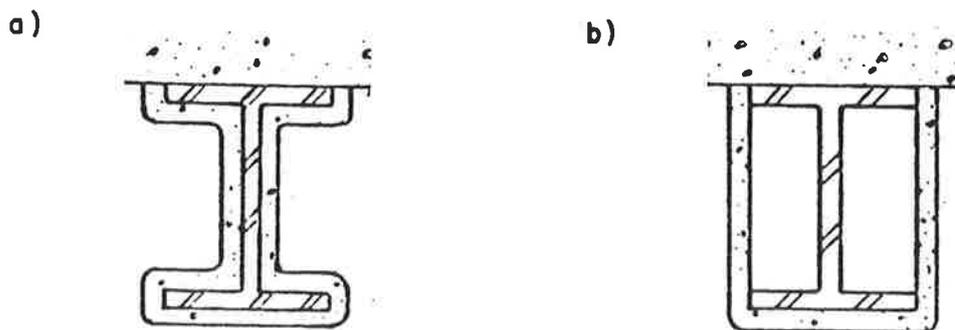


Figura 5.45 - Proteção de vigas de aço; a) tipo contorno; b) tipo "caixa".

Quanto à técnica de execução pode-se distinguir os sistemas (Figura 5.46):

- moldados com uso de fôrmas;

- aplicados manualmente;
- aplicados por jateamento;
- fixados por dispositivos ou montados.

A descrição dos sistemas será feita, no entanto, reunindo-os através de um critério misto, onde cada grupo possui semelhanças quanto às três classificações citadas e ainda quanto ao princípio de atuação como protetor contra o fogo. São eles os seguintes: concretos, argamassas, revestimentos quimicamente reativos, mantas cerâmicas, alvenarias, placas rígidas e pré-moldados com a forma do perfil.

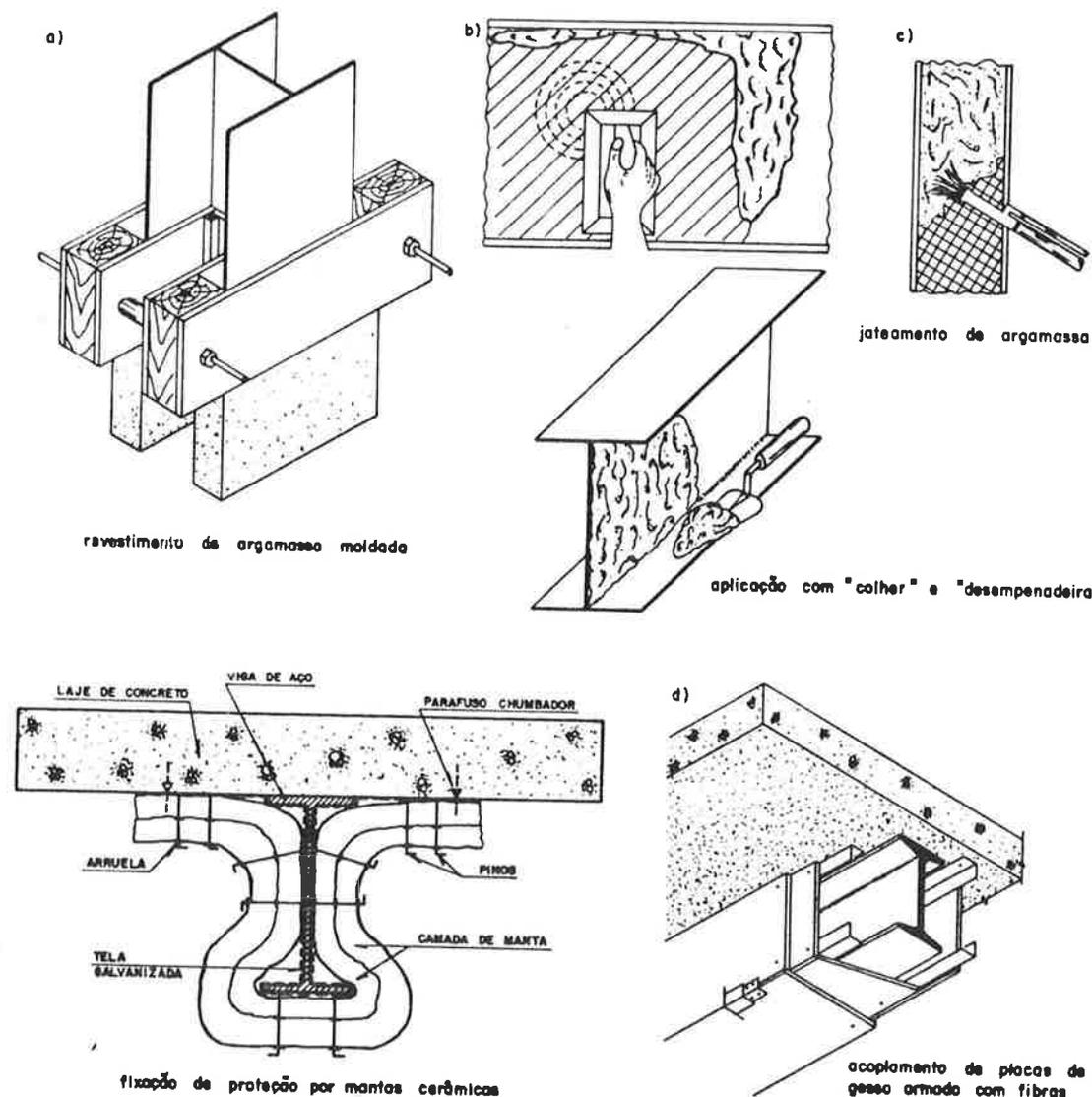


Figura 5.46 - Classificação do revestimento quanto à técnica de execução: a) moldados com uso de fôrmas; b) aplicados manualmente; c) aplicados por jateamento; d) fixados por dispositivos ou montados.

5.2.2.2.5.2 Concreto

As propriedades térmicas dos vários tipos de concreto já foram analisadas neste trabalho; os concretos leves (de agregados leves ou concretos celulares) possuem desempenho superior como isolantes.

Quanto à manutenção da integridade da proteção cabe lembrar a possibilidade de ocorrência de lascamento ("spalling").

Entendido como material moldado "in loco", o concreto costuma ser aplicado com uso de fôrmas.

5.2.2.2.5.3 Argamassas

Assim como o concreto, as propriedades protetoras das argamassas são bastante variáveis em função do tipo de aglomerante e dos agregados utilizados. Podem aliar, quanto ao princípio de proteção, um baixo coeficiente de condutibilidade térmica a altas capacidades de absorção de calor. É o caso típico do gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que mantém um alto conteúdo de umidade, mesmo após a aplicação, a qual consome grandes quantidades de energia para ser evaporada, contendo o acesso de calor ao aço revestido.

O reforço com fibras tem sido bastante adotado na medida em que se incrementa a manutenção da estabilidade, seja no que tange à aderência ao substrato ou à ocorrência de fissuras, provocando ainda um aumento de vazios internos que leva a uma redução da condutibilidade térmica.

As telas metálicas de reforço também aparecem com destaque, auxiliando na manutenção da estabilidade ou servindo de base para a consecução de revestimentos tipo "caixa".

Agregados leves tais como vermiculita e perlita, levam também à redução da condutibilidade térmica (Tabela 5.16).

A vermiculita expandida é encontrada no mercado na forma de flocos para serem dosados em obra, ou na forma de argamassas pré-misturadas a seco.

Para as argamassas de gesso pode-se considerar condutibilidades da ordem de 0,10 a 0,15 W/m °C para temperaturas variando entre 100°C e 900°C. Cabe salientar a presença de íons sulfato em uma pasta de gesso fresca, o que pode levar à corrosão de um substrato de aço.

Tabela 5.16 - Condutibilidade térmica de argamassas de cimento e vermiculita.

Traço	Densidade kg/m ³	Cond. Térmica W/m ² C
1:4	530	0,070
1:5	450	0,079
1:8	440	0,054
1:9	420	0,056

Apesar de poderem ser aplicadas através de processos manuais tradicionais de execução de revestimentos ou fazendo-se uso de formas deslizantes estas argamassas têm sido comumente aplicadas por jateamento, processo bastante mais rápido.

5.2.2.2.5.4 Revestimentos quimicamente reativos

São constituídos por materiais que, ativados pelo aumento da temperatura característico do incêndio, sofrem reações químicas de alguma forma benéficas para a contenção do fluxo de calor para o componente protegido. Dentre estas pode-se citar a intumescência e a geração térmica de umidade.

A intumescência trata-se de um fenômeno pelo qual o calor provoca uma reação em cadeia que converte um revestimento fino em uma espessa barreira isolante.

Em outros países costuma-se adotar argamassas intumescentes, cuja resistência ao fogo pode ser avaliada pela observação da Tabela 5.17. Dispõe-se no Brasil de tintas intumescentes que podem propiciar um certo acréscimo da resistência ao fogo de componentes metálicos, inferiores aos valores citados para as argamassas em função da própria redução de espessura do revestimento.

Estas tintas podem ser interessantes quando se pretende utilizar o componente metálico aparente, lembrando-se, no entanto, que não possuem isoladamente alto desempenho no que se refere à proteção contra a corrosão.

Tabela 5.17 - Resultados de ensaios de diferentes revestimentos intumescentes aplicados sobre perfil de aço tipo W 10 x 49, segundo a ASTM E-119.

	espessura do revestimento (mm)	resistência ao fogo (min)
produto A	4,8	60
	11,7	98
	13,0	107
produto B	12,7	120
	27,0	180
produto C	6,4	60
	27,0	180

Quanto a geração térmica de vapor, trata-se de um fenômeno em que uma parte do calor que tenta atravessar o revestimento é consumido em uma calcinação do material, que gera a formação de água, a qual demanda ainda uma certa quantidade de energia para ser evaporada. As argamassas à base de oxí-cloreto de magnésio funcionam desta maneira, devendo-se ressaltar, no entanto, seu caráter corrosivo se aplicada diretamente sobre uma estrutura de aço, demandando portanto uma proteção prévia contra a corrosão.

5.2.2.2.5.5 Mantas cerâmicas

Fibras cerâmicas podem ser prensadas, através da passagem por cilindros metálicos, de forma a se obter mantas de diferentes densidades, caracterizadas por comportarem-se como eficiente isolante térmico a altas temperaturas, devido a suas características de condutibilidade e reflexão.

A condutibilidade térmica pode variar de 0,10 a 0,25 W/m °C para temperaturas entre 100 e 900°C, para mantas de densidades de 64 a 192 kg/m³.

O material apresenta-se na forma de rolos sendo que, para perfis pequenos (até cerca de 8") pode ser colocado na forma de caixa, tendo como suporte uma tela metálica que envolva o perfil.

As aplicações tipo contorno são conseguidas pela fixação da manta através de pinos soldados ao componente e de arruelas rápidas. Deve-se adotar mais de uma camada de manta com juntas defasadas.

As mantas não resistem à umidade e à abrasão o que pode, em certos casos, levar à necessidade de execução de um revestimento protetor sobre elas.

5.2.2.2.5.6 Alvenarias

As alvenarias, solução tradicional para revestimento das estruturas de aço, não têm sido usadas com tanta frequência em função do seu peso próprio, espaço ocupado ou velocidade de execução. Se para o caso de pilares e vigas pode-se apresentar como solução de interesse, a situação torna-se muito mais difícil quando se trata de lajes.

5.2.2.2.5.7 Placas rígidas

As placas rígidas de materiais que possuem bom desempenho como isolantes térmicos a altas temperaturas podem ser recortadas e acopladas de forma a envolver a estrutura de aço, protegendo-a contra o fogo. Podem ser utilizadas placas de argamassa de vermiculita expandida, concreto celular e gesso armadas ou não com fibras, de mantas cerâmicas prensadas com ligantes, etc.

Deve-se reservar um cuidado especial quanto às juntas entre as placas. As deformações que acontecem devido a altas temperaturas não podem comprometer a estanqueidade do sistema de proteção. Dentro deste espírito, recomenda-se a adoção de mais de uma camada de placas na proteção, defasando as juntas entre elas (vide Figura 5.46.d).

Pelos mesmos motivos, deve-se ainda garantir que uma eventual estrutura de sustentação das placas (como no caso de forros suspensos) não seja solicitada a ponto de comprometer a estanqueidade do sistema.

5.2.2.2.5.8 Pré-moldados com a forma do perfil

Coerente com o conceito de padronização que a construção industrializada oferece como horizonte, uma solução extremamente interessante é a de se pré-fabricar componentes de proteção específicos para determinados perfis de grande utilização. A padronização de perfis é importante para o sucesso desta solução.

Em outros países encontram-se soluções em argamassa de vermiculita expandida, gesso, concreto, etc.

Na Figura 5.47 mostra-se uma solução tipo "caixa" obtida com peças com formato de "U", para vigas de aço.

Na Figura 5.48 mostra-se ainda a possibilidade de se utilizar blocos cerâmicos ou de gesso com formatos especialmente desenvolvidos.

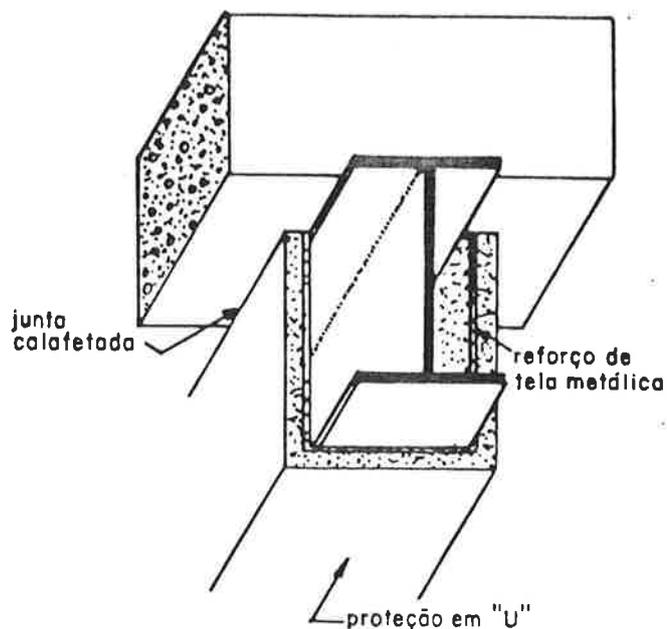


Figura 5.47 - Sistema pré-moldado de proteção para vigas.

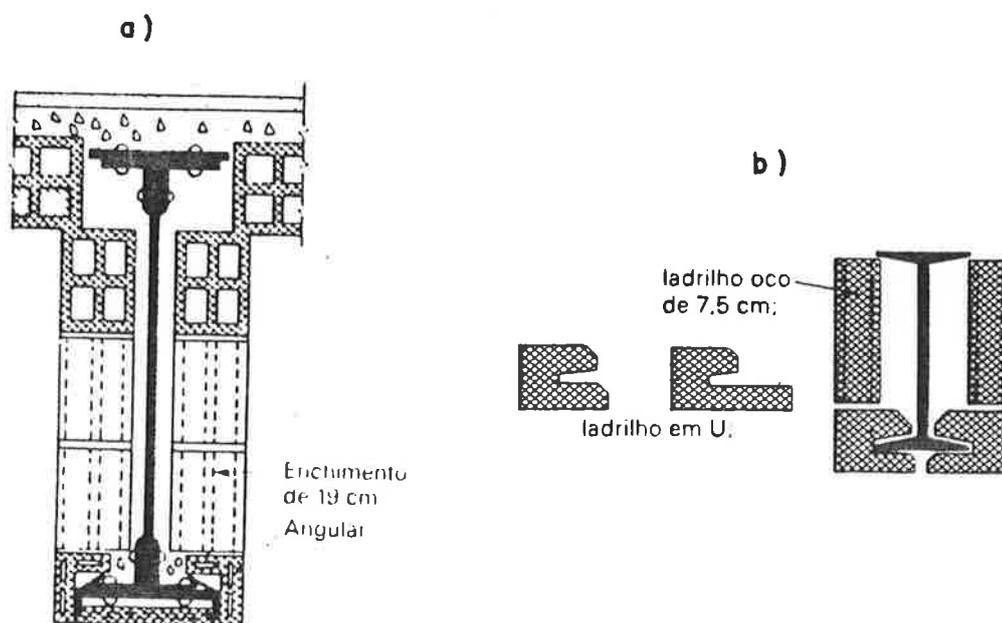


Figura 5.48 - Utilização de blocos com formatos especiais:
a) cerâmicos; b) de gesso.

5.2.2.3 Exemplos de Lajes Resistentes ao Fogo

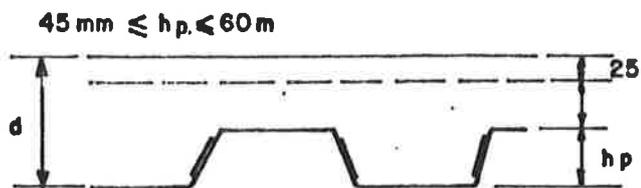
Passa-se, a seguir, à descrição de algumas lajes compostas que, seja através de ensaios ou considerações analíticas, foram citadas na bibliografia consultada como possuidoras de certo grau de resistência ao fogo.

Alguns resultados ingleses (119) quanto à resistência ao fogo de lajes feitas com perfis trapezoidais e "rabo-de-andorinha", sem adoção de revestimentos, encontram-se indicados na Tabela 5.18. Algumas premissas adotadas na sua obtenção são:

- lajes projetadas e testadas segundo a norma BS 5950 parte 4 (10);
- carregamentos admissíveis de 670 kgf/m^2 ;
- lajes contínuas com pelo menos 1 apoio intermediário (a resistência ao fogo de uma laje bi-apoiada é considerada, a princípio, como somente de 30 minutos);
- a relação vão/altura total da laje é limitada a 35.

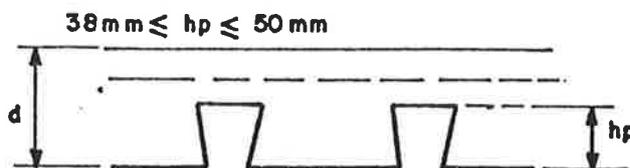
Observe-se que a armadura adicional indicada na Tabela 5.18 não foi concebida prioritariamente para cumprir o papel de reforço estrutural para suprir a perda da capacidade resistente da chapa dobrada.

Tabela 5.18 - Resistência ao fogo de lajes compostas analisadas pelo CIRIAC (Construction Industry Research and Information Association).



VÃO MÁXIMO	RESISTÊNCIA AO FOGO	ESPESSURA MINIMA		ARMADURA ADICIONAL
		CHAPA	d	
2700	1h	0.8	130	A 142
3000	1h	0.9	130	A 142
	1½ h	0.9	140	A 142
3600	1h	1.0	130	A 193
	1½ h	1.0	140 *	A 193
-	2 h	-	160	FE

2500	1 h	0.8	105	A 142
	1½ h	0.8	115	A 142
3000	1 h	0.9	120	A 142
	1½ h	0.9	130	A 142
3600	1 h	1.0	125	A 193
	1½ h	1.0	135	A 193
-	2 h	-	125	FE



Observações:

- . densidade do concreto: 2400 Kg/m³.
- . FE = armadura adicional deve ser calculada para proporcionar a resistência ao fogo requerida.
- . * = são recomendáveis para estes casos.
- . A 142 = armadura adicional com tensão de escoamento mínima de 485 N/mm² e taxa de armadura de 142 mm²/metro (equivale a ϕ 6 mm a cada 20 cm).
- . A 193 = conforme acima , com taxa de 193 mm²/metro (equivale a ϕ 6 mm a cada 15 cm).

Do catálogo do produto finlandês PEVA 45 (17) pode-se extrair os dados constantes da Tabela 5.19.

Tabela 5.19 - Resistência ao fogo de lajes compostas feitas com chapas PEVA 45: a) vãos máximos para resistências de 30 e 60 minutos; b) armadura adicional na forma de barras.

a)

ALTURA TOTAL DA LAJE (mm) E GRAU DE RESISTÊNCIA AO FOGO (min)	LAJE CONTÍNUA DE DOIS TRAMOS		LAJE SIMPLEMENTE APOIADA	
	CARREGAMENTO ADMISSÍVEL 1,25 KN/m ²	CARREGAMENTO ADMISSÍVEL 2,50 KN/m ²	CARREGAMENTO ADMISSÍVEL 1,25 KN/m ²	CARREGAMENTO ADMISSÍVEL 2,50 KN/m ²
100 A 30	5,1	4,8	5,1	4,6
A 60	2,3	2,1	2,1	1,6
140 A 30	6,5	6,1	5,7	5,2
A 60	3,9	3,4	2,3	1,9
180 A 30	7,5	7,0	6,1	5,6
A 60	5,1	4,3	2,6	2,3
220 A 30	8,0	7,5	6,4	5,8
A 60	6,1	5,0	2,8	2,6

b)

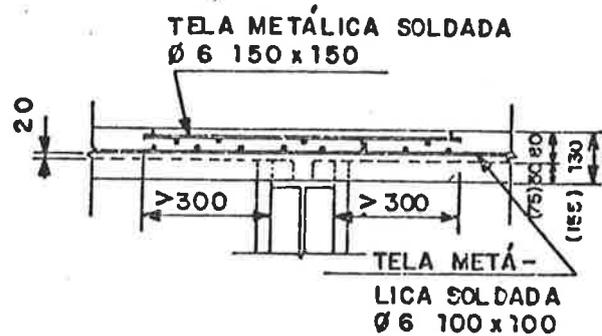
h (mm ²)	A _s (mm ²)
100	610
140	853
180	1077
220	1309

Dos catálogos dos produtos japoneses da Nittetsu (11,12,13,14,15) indica-se, na Tabela 5.20, alguns esquemas considerados resistentes a 1 hora de fogo sem revestimento adicional.

Tabela 5.20 - Lajes compostas resistentes a 1 hora de fogo, confeccionadas com produtos da Nittetau: a) EV 50 e E U_A (dimensões entre parêntesis); b) EZ 50 e EZ 75 (dimensões entre parêntesis).

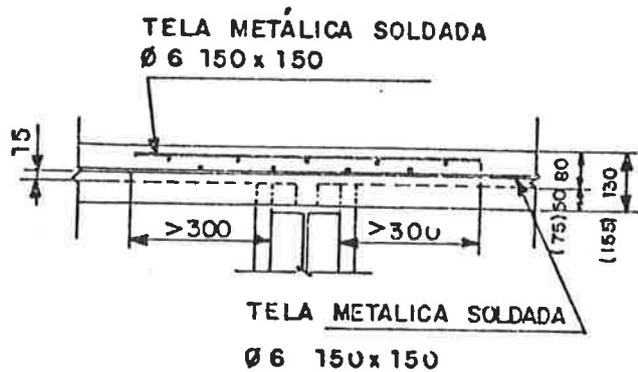
a)

CHAPA	VÃO MÁXIMO	CARREGAMENTO ADMISSIVEL
EV 50	2,5 m	300 Kg/m ²
E U _A	2,7 m	300 Kg/m ²



b)

CHAPA	VÃO MÁXIMO	CARREGAMENTO ADMISSIVEL
EZ50, EZ 75	2,4 m	550 Kg/m ²
EZ50, EZ 75	2,7 m	400 Kg/m ²



Alguns resultados de ensaios de resistência ao fogo de lajes compostas (28) encontram-se listados na Tabela 5.21.

Teste	Laboratório	Descrição do teste	Arranjo e seção transversal do corpo de prova	Reações de apoio idealizadas	Resistência ao fogo (min)
1	TNO Netherlands	Bi-apoiado; perfil trapezoidal com mogas com 1,9 m de largura; inexistência de armadura adicional			28
2	TNO	Idem a "1" com contenção à deformação longitudinal			40
3	EMPA Switzerland	Bi-apoiado; perfil "rabo-de-andorinha"			55
4	EMPA	Idem a "3"; com armadura adicional 8 mm cada 15 cm			95
5	EMPA	Idem a "3"; com espessura aumentada			69
6	Braunschweig West Germany	Bi-apoiado; com restrição à deformação horizontal; perfil "rabo-de-andorinha"			117 127
7	Braunschweig	Idem a "6"; com armadura adicional 8 mm cada 15 cm			112 116
8	Commonwealth expt building station Austrália	Vão simples com balanço perfil "rabo-de-andorinha"; armadura adicional com tela eletrossoldada nº 30 6			120
9	TNO	Vão duplo; perfil trapezoidal com mogas com 1,27 m de largura; presença de armadura			48
10	TNO	Vão triplo; perfil trapezoidal com mogas; investigação do vão central			64
11	TNO	Bi-apoiado; presença de forro suspenso a 10 cm de distância			110

Tabela 5.21 - Resultados de testes de lajes compostas indicados na "European Recommendations for Steel Construction Publication".

Descrevem-se, a seguir, três lajes compostas cuja resistência ao fogo foi verificada analiticamente por Newman e Walker (118):

1ª) laje contínua com camada única de tela adequadamente conformada (Figura 5.49):

- parâmetros de projeto

- . distância entre os centros das vigas de apoio (vão) de 3 m;
- . utilização de concreto leve com espessura total de laje de 115 mm;
- . resistência cúbica do concreto de 25 N/mm²;
- . perfil de aço trapezoidal com 50 mm de altura;
- . resistência ao fogo de 1 hora.

- carregamentos

- . permanentes totalizando 2,99 kN/m² (1,74 kN/m² de peso próprio; 0,25 kN/m² de instalações; 1,00 kN/m² de vedações);
- . acidentais de 3,00 kN/m².

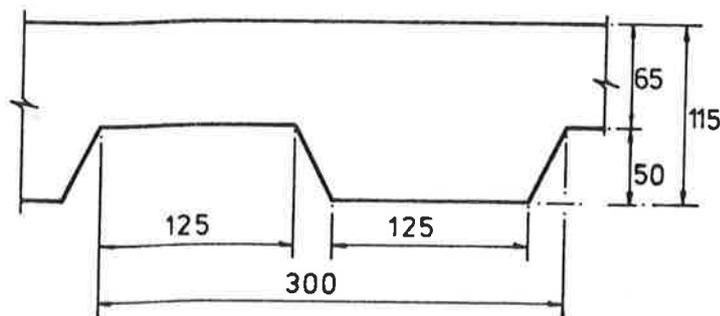


Figura 5.49 - Seção da laje composta relativa ao 1º caso estudado.

- armadura adicional

- . tela eletrossoldada composta por fios de 4 mm de diâmetro formando pares distanciados de 300 mm (compatibilidade com a geometria do perfil) sendo que cada fio fica a 50 mm do seu parceiro; a tela é conformada da maneira indicada na Figura 5.41.b;

- . os apoios extremos da laje contínua recebem barras longitudinais adicionais de 5 mm de diâmetro, espaçadas de 300 mm.

2ª) Laje contínua com duas camadas de tela eletrossoldada (Figura 5.50):

- parâmetros de projeto

- . vão de 2,8 m;
- . espessura total de 155 mm;
- . resistência cúbica do concreto de 30 N/mm²;
- . perfil do aço trapezoidal com altura de 50 mm;
- . resistência ao fogo de 1 1/2 hora.

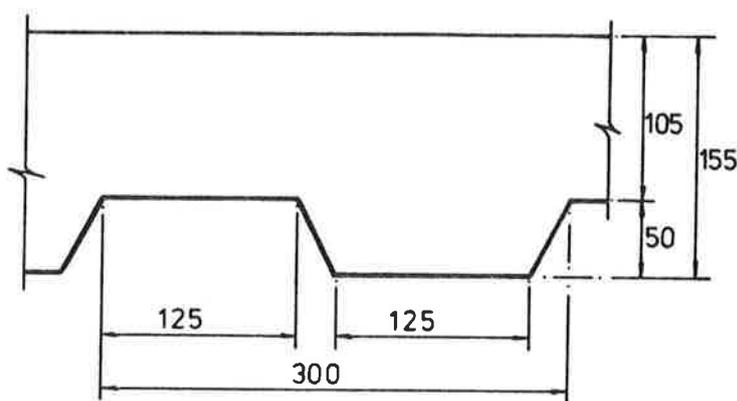


Figura 5.50 - Seção da laje composta relativa ao 2º caso estudado.

- armadura adicional

- . a camada superior é composta por uma tela A-98, constituída por fios de 5 mm de diâmetro espaçados de 200 mm, e abrangendo toda a área da laje;
- . a camada inferior é composta por tela constituída por fios de 6 mm de diâmetro, espaçados de 300 mm de forma a compatibilizar-se com o perfil, disposta sobre a chapa dobrada;
- . utilizou-se o mesmo reforço indicado no caso anterior quanto aos apoios de extremidade.

3ª) laje bi-apoiada (Figura 5.51):

- parâmetro de projeto

- . vão 3,0 m;
- . utilização de concreto leve com espessura total de laje de 100 mm;
- . resistência cúbica do concreto de 25 N/mm^2 ;
- . perfil "rabo-de-andorinha" com altura de 50 mm;
- . resistência ao fogo de 1 hora.

- carregamentos

- . permanentes totalizando $3,15 \text{ kN/m}^2$ ($1,90 \text{ kN/m}^2$ de peso próprio; $0,25 \text{ kN/m}^2$ de instalações; $1,00 \text{ kN/m}^2$ de vedações);
- . acidentais de $5,00 \text{ kN/m}^2$.

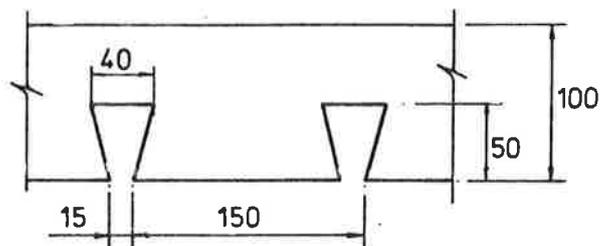


Figura 5.51 - Seção de laje composta relativa ao 3º caso estudado.

- armadura adicional

- . barras de 10 mm de diâmetro dispostas longitudinalmente a cada 150 mm (de forma a posicionar-se no centro da nervura de concreto) ao nível do topo das nervuras;
- . as barras longitudinais são sustentadas por outras transversais com seção mínima perfazendo 0,1% da seção de concreto acima das nervuras.

O "Uniform Building Code" divulga periodicamente listas contendo esquemas construtivos que foram aprovados como resistentes a certo período de fogo. Descrevem-se abaixo alguns casos relativos a lajes compostas resistentes a 1 e 2 horas de fogo (120).

Para a concepção de laje indicada na Figura 5.52, as empresas abaixo indicadas conseguiram certificações de 1 hora de resistência ao fogo:

- "Granco Steel Products Company":

- . produto denominado COFAR;
- . espessura da chapa de 0,7 a 1,0 mm, com altura de 3,8 a 5,0 cm;
- . utilização de concreto comum com espessura de 8,2 cm;
- . vão máximo de 365 cm.

- "H. H. Robertson Company":

- . produtos denominados Robertson DC e Robertson ADC nº 5;
- . espessura de concreto leve de 7 cm ou de 7,6 cm para concreto comum.

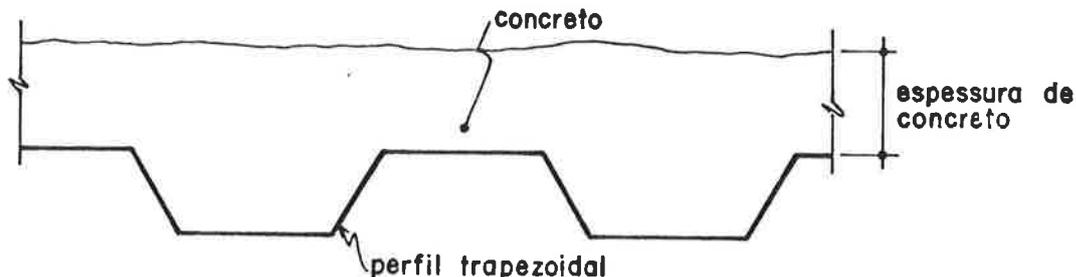


Figura 5.52 - Esquema de laje composta não revestida.

Para a mesma concepção mostrada na Figura 5.52, as empresas abaixo relacionadas conseguiram certificações de 2 horas de resistência ao fogo:

- "H. H. Robertson Company":

- . para os produtos QL-3, QL-UKX, QL-21, QL-NKX, com espessura de concreto leve de 8,2 cm, para vãos máximos de 365 cm;
- . para o produto Robertson DC, com espessura de 7,6 cm de concreto leve, com vão máximo de 243 cm.

- "Granco Steel Products Company":

- . produto denominado COFAR;
- . espessura da chapa de 0,7 a 1,0 mm, com altura de 3,8 a 5,0 cm;
- . utilização de concreto comum com espessura de 10,1 cm;
- . vão máximo de 365 cm.

5.3 A PROTEÇÃO PASSIVA COM MATERIAIS DISPONÍVEIS NO MERCADO NACIONAL

Para complementação da análise do panorama brasileiro quanto à segurança ao fogo das lajes compostas, contactou-se seis fabricantes nacionais de produtos com perspectiva de utilização na proteção passiva do componente, os quais estão listados abaixo em ordem alfabética:

- Eucatex - Mineração do Nordeste S.A;
- Fibras Cerâmicas Ltda;
- Gypsalum - Gesso e Alumínio Ltda;
- Gypsum do Nordeste S.A;
- Minebra - Minérios Brasileiros Mineração e Industrialização Ltda;
- Sumaré Indústria Química S.A.

A todos eles, após um primeiro contato informal situando o problema, foi solicitado um estudo através de carta que, basicamente, referia-se ao estudo da proteção contra fogo da laje composta, fazendo uso de seus produtos atuais. Nesta carta indicou-se a perspectiva de as informações fornecidas (à exceção dos custos) serem utilizadas no âmbito desta dissertação; em anexo seguiram informações a respeito do componente a ser estudado, conforme se indica no Anexo I.

As respostas foram discutidas posteriormente, através de reuniões com representantes do corpo técnico destas empresas. Passa-se, a seguir, ao resumo das principais conclusões a que se chegou.

5.3.1 "Eucatex"

A "Eucatex" produz o denominado "Isopiro", "um pré-misturado a seco de vermiculita expandida, aditivos e cimento" (121) que, misturado com água quando da aplicação, pode ser

utilizado como argamassa para revestimento de proteção contra fogo.

O produto é normalmente aplicado por jateamento, em camadas sucessivas, sendo reforçado por telas de aço que podem ser obtidas por "expansão" de chapas de aço galvanizadas - normalmente utilizadas em aplicações tipo "caixa" - ou por eletrossoldagem de forma a obter malhas quadradas a partir de fios de aço - normalmente utilizadas em aplicações tipo "contorno".

Em grande parte das aplicações as telas devem ser afixadas ao substrato metálico através de pinos soldados a este, espaçados de no máximo 30 cm.

O consumo de material, sem consideração das perdas, é de 804 kg por m² de revestimento. Para o processo de aplicação completo (soldagem de pinos, colocação de telas, jateamento de "Isopiro" e acabamento) estima-se um consumo de 8 homens x hora por m² (até espessuras da ordem de 32 mm, que demanda aplicação em 2 camadas).

O consumo de água é de 32 litros por 49 kg de "Isopiro" (para aplicação por jateamento), sendo que o consumo médio de aditivo é de 1 litro para cada 5 kg do material. Este aditivo, utilizado para otimizar a aderência e a plasticidade do material, é utilizado normalmente apenas na primeira camada aplicada.

Um possível esquema para lajes compostas seria o indicado na Figura 5.53.

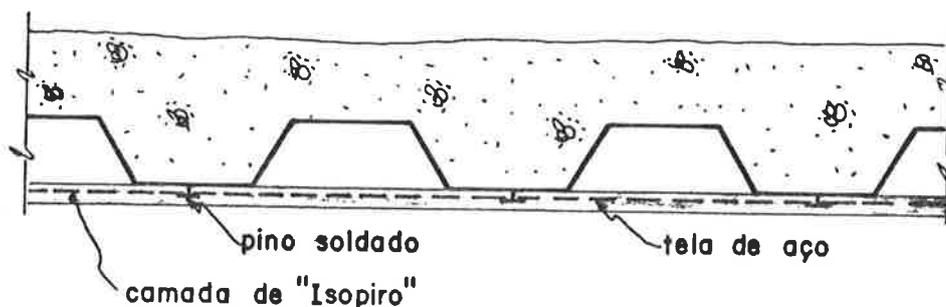


Figura 5.53 - Possível esquema para aplicação de "Isopiro" em lajes compostas.

Em reunião com o Eng^o Silvio Piga, discutiu-se a análise que a empresa fez do problema proposto:

1º) O procedimento de dimensionamento da espessura do revestimento de perfis metálicos utilizado pela empresa não é aplicável ao caso da laje composta, que possui características geométricas e de peso por área muito distintos dos perfis usuais das construções metálicas. A aplicação do procedimento, apenas a título de curiosidade, levou a resultados incompatíveis.

2º) discutiu-se a possibilidade de utilização do "Isopiro", não como um material que conseguisse manter o trabalho solidário chapa-concreto durante o incêndio, e sim como isolamento térmico para eventuais armaduras adicionais, na forma de vergalhões, existentes no interior da laje composta.

3º) os técnicos da Eucatex não acreditam na viabilidade técnico-econômica da utilização de seu produto no sentido de garantia do trabalho solidário chapa-concreto, alegando a possibilidade de perda da aderência chapa-concreto - conforme anteriormente discutido - em função de variações dimensionais diferenciais.

4º) em reunião com o consultor americano Richard Gerwain houve uma concordância a respeito do ponto de vista indicado no item anterior. Este engenheiro completou a discussão com um depoimento de que, em grande parte das vezes, não se faz a proteção das lajes compostas nos EUA; descreveu ainda que, mesmo protegida, após um incêndio seria bem provável a perda da laje composta em função da perda do trabalho solidário. Portanto, garantida a evacuação dos habitantes do edifício, mostra-se atualmente mais viável em seu país a não proteção do componente, sendo este refeito posteriormente no caso de um eventual incêndio.

5.3.2 "Fibras Cerâmicas"

A "Fibras Cerâmicas", antiga "Babcock & Wilcox", fornece componentes obtidos a partir de fibras de material cerâmico, seja na forma de mantas ou na forma de placas originadas na prensagem a vácuo das fibras acrecidas de um ligante.

O funcionamento como protetor contra fogo está intimamente associado à capacidade de as fibras refletirem as radiações originadas no incêndio; daí o fato de que, quanto maior a densidade da manta ou placa de fibras cerâmicas ter-se um melhor desempenho frente ao fogo.

As mantas, denominadas "Kaowool", são normalmente fornecidas com as seguintes dimensões:

- largura de 610 mm;
- comprimento de 7620 mm;

- espessuras de 25 ou 38 mm.

Quanto à densidade do produto, a manta de 25 mm apresenta-se com 96 kgf/m², enquanto a de 38 mm com 128 kgf/m².

São entregues na forma de "rolos" embalados em caixas de papelão. Para temperaturas elevadas constantes adota-se como limite de trabalho 1260°C; seu ponto de fusão, no entanto, é definido para 1760°C.

Nas aplicações tipo "caixa" é conveniente a adoção de uma tela para servir como base de apoio para as mantas; nas aplicações tipo "contorno" são afixados pinos sobre o substrato aos quais as mantas são acopladas (vide Figura 5.46.d). Recomenda-se a adoção de mais de 1 camada de manta, as quais são posicionadas de forma a se "desencontrar" as juntas. São utilizados por volta de 15 pinos por m² revestido, sendo que as recomendações quanto ao espaçamento máximo destes em relação às mantas que compõem a camada final do esquema estão indicadas na Figura 5.54.

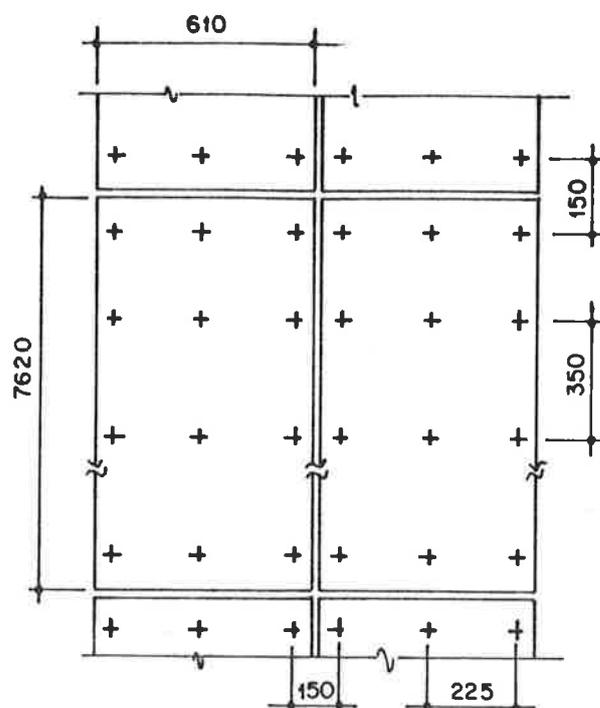


Figura 5.54 - Espaçamentos máximos dos pinos para afixação da manta (h).

Em reunião com o Eng^o Robson Santos Barradas, discutiu-se a análise que a empresa fez do problema proposto:

1ª) recomenda-se a adoção de duas mantas Kaowool 1260, com densidade de 96 kgf/m^3 e com espessura unitária de 25 mm, aplicadas com juntas defasadas e de forma a constituir um plano horizontal de proteção, fixadas à chapa de aço através de pinos solidarizados a esta (Figura 5.55).

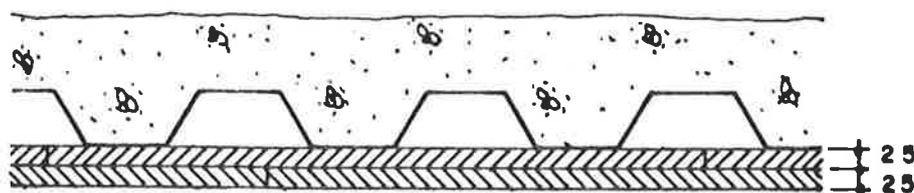


Figura 5.55 - Esquema proposto para laje composta, com 2 mantas Kaowool 1260, 25 mm de espessura unitária e densidade de 96 kgf/m^3 .

Esta escolha baseou-se na existência de resultados de ensaio feito com "anteparas" revestidas com este esquema para fogo padrão incidindo na face revestida (Figura 5.56). As anteparas foram consideradas corta-fogo por 60 minutos, o que implica em que a superfície do lado oposto à de contato com o fogo não atingiu uma temperatura média de 120°C nem pontual de 180°C durante esse período; desta forma, acredita-se que o esquema possa propiciar 1 hora de resistência ao fogo.

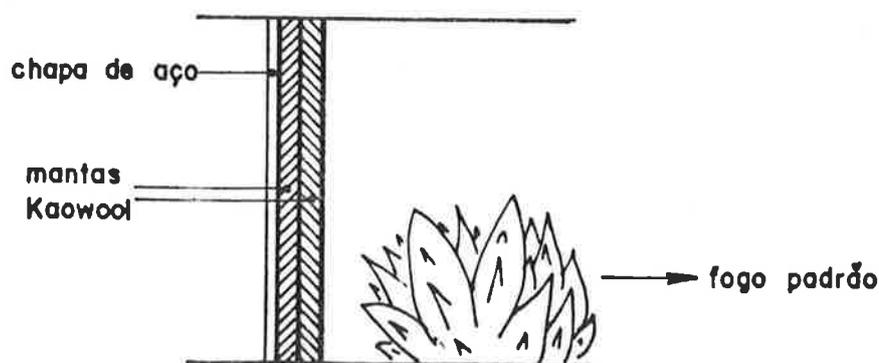


Figura 5.56 - Esquema de antepara revestida com mantas Kaowool considerado corta-fogo por 1 hora.

2ª) Quanto ao aspecto final do revestimento de proteção contra-fogo tem-se dois caminhos:

- deixá-lo aparente ou recoberto por tecido aluminizado;
- acoplamento de componentes rígidos constituindo um forro-falso.

No primeiro caso adotam-se, para a afixação das mantas, pinos ranhurados e arruelas de pressão (Figura 5.57.a). No segundo caso são adotados pinos com rosca, aos quais são solidarizados perfis "cartola" através de arruela e porca, os quais servem de base para afixação das placas de forro, que podem ser feitas dos mais diversos materiais (Figura 5.57.b).

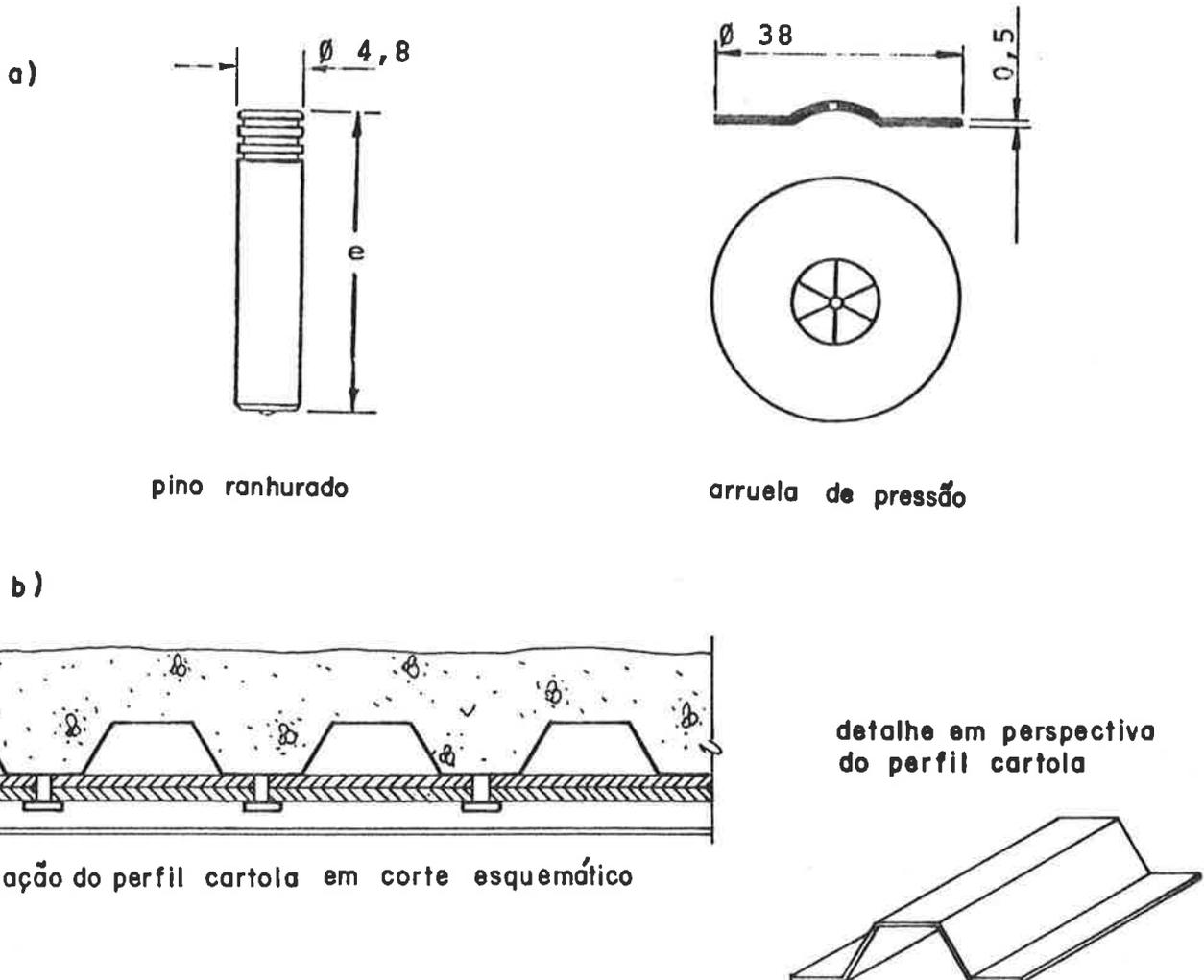


Figura 5.57 - Afixação das mantas: a) com parafuso ranhurado e arruela de pressão; b) com pino rosqueado e perfil cartola.

5.3.3 "Gypsalum"

A "Gypsalum", entre outros produtos, fornece componentes modulares de gesso para a confecção de forros-falsos suspensos.

No entanto, segundo depoimentos do Eng^o Samuel Chernizon, os produtos disponíveis hoje em sua empresa não se prestam à proteção contra fogo de lajes.

Complementou a discussão, no entanto, descrevendo experiências que vem sendo hoje desenvolvidas internamente na Gypsalum no sentido de desenvolver a utilização de gesso reforçado com fibras, material que, segundo seu conhecimento, deve mostrar-se altamente promissor na função de proteção contra fogo. Destacou ainda que, dentre algumas propriedades interessantes no cumprimento desta função, está a invariabilidade dimensional sob a elevação de temperatura; no caso do gesso comum, a alta expansão térmica certamente geraria fissuração dos componentes, comprometendo a segurança contra o fogo dos componentes revestidos pelo mesmo.

5.3.4 "Gypsum"

A empresa "Gypsum fabrica uma chapa de gesso com superfícies revestidas por um "cartão", que pode ser utilizada na confecção tanto de vedações verticais quanto de forros-falsos.

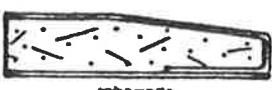
A produção dos componentes passa basicamente pelas seguintes etapas: calcinação da gipsita; mistura com água e aditivos e lançamento da pasta obtida sobre um cartão continuamente desenrolado; laminação da superfície superior simultaneamente à aplicação do outro cartão nesta face; corte dos painéis; secagem final.

O cartão, além de propiciar uma maior uniformidade e resistência ao desgaste da superfície do componente, aumenta a sua resistência mecânica.

As chapas podem ser fornecidas com diferentes tipos de bordas e dimensões, conforme se observa na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Características gerais das chapas "Gypsum": a) tipos de borda; b) dimensões e pesos.

a)

TIPOS DE BORDA		
PERFIL	TIPO	UTILIZAÇÃO
 rebatida	BR	Para sistema de junta invisível
 quadrada	BQ	Para forros removíveis e divisórias

b)

MEDIDAS			PESO
ESPESSURA (mm)	LARGURA (m)	COMPRIMENTO (m)	Kg/m ²
10	0,58 e 1,20	até 3,00	9,5
12,5	0,58 e 1,20	até 3,00	11,5
15	0,58 e 1,20	até 3,00	13,5
25	0,55	variável	21

O corte das chapas é bastante simplificado, podendo ser conseguido por dois caminhos:

- corte do cartão numa das faces com faca, flexão da chapa segundo a linha cortada e corte do cartão na outra face;
- corte com serrote comum.

A estruturação dos painéis, para a confecção de componentes de vedação vertical ou forros (Figura 5.58), pode ser feita com perfis de chapa de aço dobrada espaçados de 60 cm, e afixados às chapas "Gypsum" por meio de parafusos tipo "cálice" espaçados de 30 cm no caso da "Parede AC" e 25 cm no caso do "Forro FGE".

Em reunião com o Sr. Carlos Roberto de Luca, discutiu-se a posição da empresa quanto ao problema proposto:

1º) a "Gypsum" não possui resultados obtidos por meio de ensaios quanto ao desempenho ao fogo de forros obtidos com suas chapas. No entanto, alguns testes realizados com componentes para vedação vertical "poderiam servir como referência para o estudo".

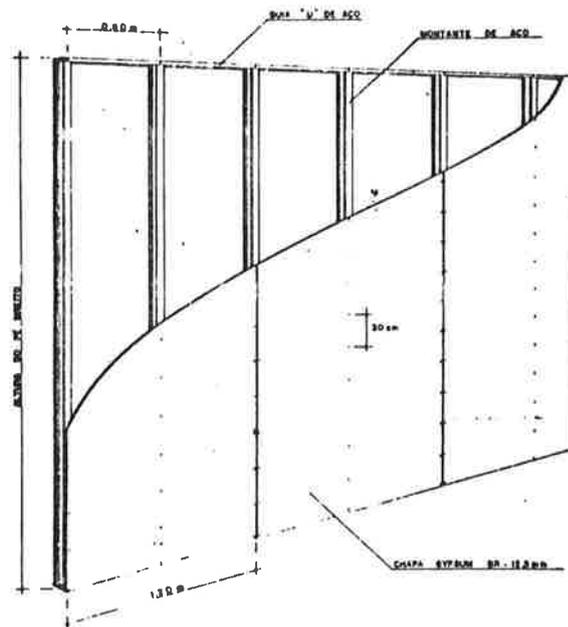
Em ensaios realizados no IPT a "Parede AC" mostrada foi considerada corta-fogo por 30 minutos, enquanto o componente denominado "Parede AC com dupla camada de chapas" (análogo ao interior, porém com duas camadas de chapa "Gypsum" de cada lado, com juntas desencontradas) resistiu por 60 min.

O final dos ensaios foi sempre determinado pela ruína das chapas em contato direto com o fogo, e a subsequente ruína da estruturação do componente, determinando a ruína do componente como um todo. Portanto, o estágio final nunca foi alcançado por transmissão excessiva de calor.

Em função dos resultados para a "Parede AC", estima-se que um esquema de forro similar ao "Forro Fixo FGE" pudesse incrementar a resistência ao fogo de valores próximos a 30 min; a flexão das chapas devido ao peso próprio talvez determinasse um desempenho um pouco inferior para o caso do forro. A utilização de dupla camada de chapas, com juntas desencontradas deveria, analogamente, incrementar o desempenho de maneira semelhante ao verificado para a "Parede AC".

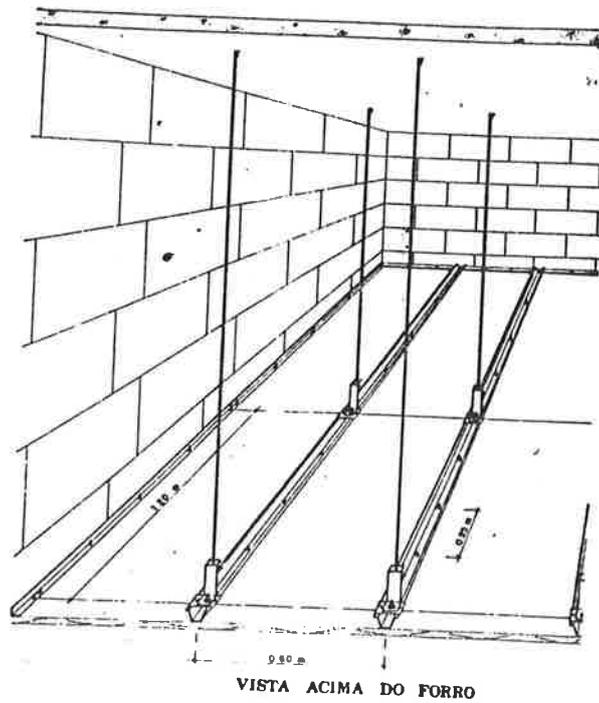
2º) quanto à fixação do forro à laje composta, poder-se-ia pensar em fazê-la por parafusos solidarizando diretamente as chapas às nervuras da laje, ou através de tirantes afixados à laje através de pinos fixados à chapa dobrada previamente à sua concretagem.

a)



MONTAGEM DA PAREDE AC

b)



VISTA ACIMA DO FORRO

Figura 5.58 - Exemplos de componentes passíveis de serem confeccionados com os painéis Gypsum: a) "Parede AC"; b) "Forro Fixo FGE".

5.3.5 "Minebra"

Dos produtos fornecidos pela "Minebra" pode-se destacar, para a utilização como proteção contra fogo na construção civil:

- "Vermimassa", pré-misturado a seco constituído por vermiculita expandida e cimentos de aluminato de cálcio;
- "Vermiplac", placa de vermiculita expandida aglomerada com ligante mineral;
- "Vermicol", adesivo mineral resistente a altas temperaturas que pode ser utilizado como tinta intumescente.

A "Vermimassa" tem sido tradicionalmente aplicada por processo manual ou através de formas. Considera-se, na aplicação manual, um consumo de 750 kg de material por m³ de argamassa, a qual é obtida pela adição de 0,7 litros de água por kg de vermiculita. A produtividade é estimada, para espessuras corriqueiras, como sendo a metade daquela associada a aplicações de massa grossa em revestimentos argamassados tradicionais.

Para "Vermimassa" tipo 1000 (temperatura máxima de uso de 1000°C), o fabricante indica:

- massa específica aparente de 0,42 kgf/dm³;
- resistência à compressão de 5 a 6 kgf/cm²;
- condutibilidade térmica aproximada de 0,16 kcal.m/m².h.°C.

Encontra-se em estágio inicial de desenvolvimento o estudo da aplicação do produto através de jateamento, o qual pode ser bastante interessante em várias situações.

Quanto às placas de "Vermiplac", são fornecidas nas medidas de (300 x 300) e (500 x 500) mm², com espessuras de 10 a 44 mm. O fabricante indica:

- massa específica aparente de 0,45 a 0,52 kgf/dm³;
- condutividade térmica aproximada de 0,10 kcal.m/m².h.°C.

Quanto à aplicação do "Vermicol" como tinta intumescente, indica-se o uso de pistolas para obtenção de películas de 2 mm.

Em reunião com o Sr. Urames P. Santos, discutiu-se a análise que a empresa fez do problema proposto:

1ª) em função da pequena espessura da chapa de aço em relação à de concreto verificada na laje composta, este último material atua como uma "barreira" ao calor, de forma que a energia originada num incêndio no ambiente sob a laje acabaria se "acumulando" na chapa dobrada.

2ª) na tentativa de se analisar o que aconteceria com a laje composta durante um incêndio, executou-se no âmbito da própria empresa um ensaio onde se procurou uma analogia com o caso real (Figura 5.59.a).

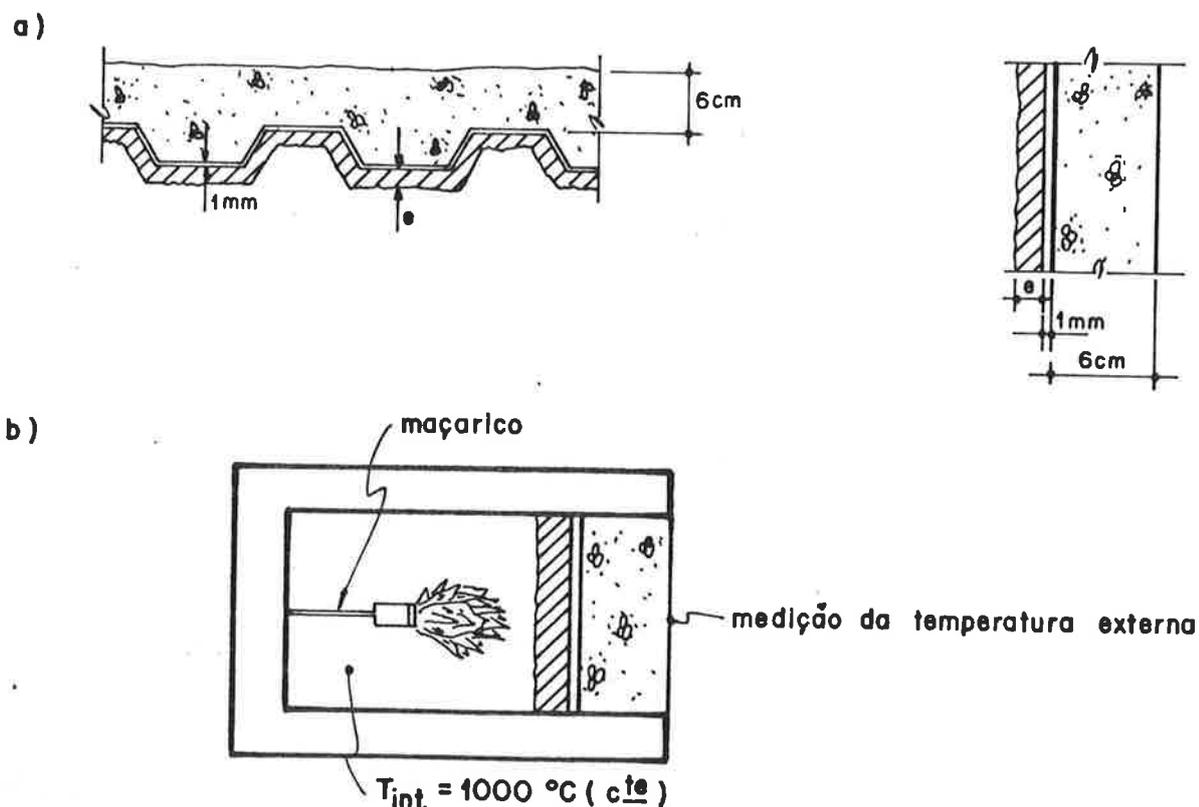


Figura 5.59 - Ensaio feito na "Minebra": a) analogia da laje composta com o corpo de provas; b) esquema do forno usado no ensaio.

O ensaio fez uso de um pequeno forno, mantido internamente a uma temperatura constante de 1000°C desde o início do ensaio, sendo medida a temperatura ao longo do tempo na face externa. Os resultados obtidos, para espessuras de vermiculita de 15, 20, 30 e 60 mm podem ser vistos na Figura 5.60.

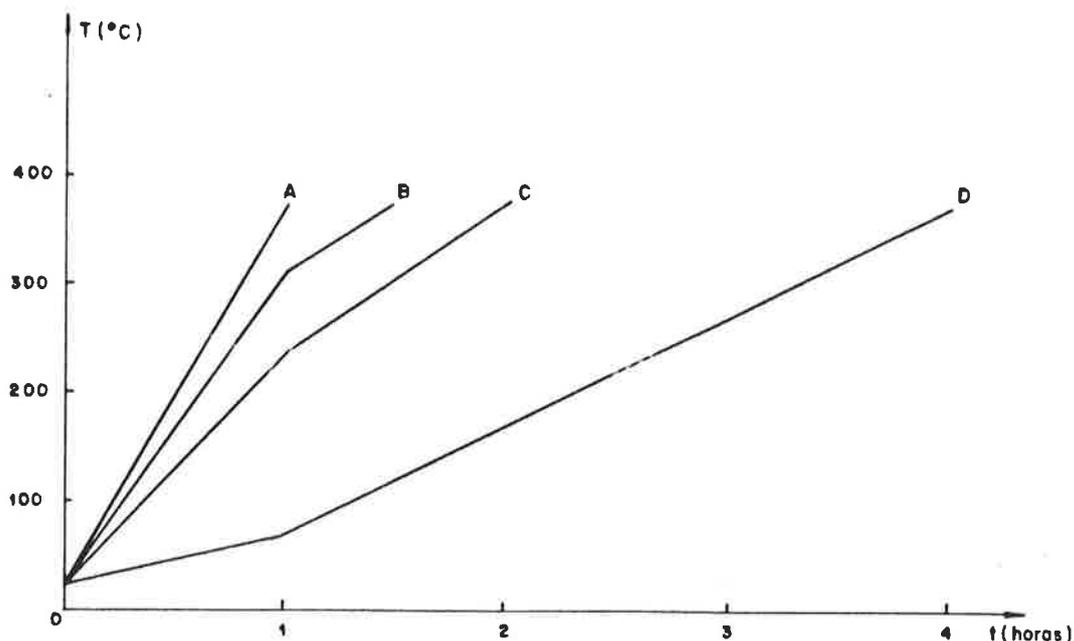


Figura 5.60 - Resultados dos ensaios feitos pela "Minebra".

Definida a temperatura crítica para a laje composta - dado não encontrado na bibliografia consultada neste trabalho - ter-se-ia uma idéia da resistência ao fogo do componente para cada espessura de revestimento.

3º) recomenda-se, para esta aplicação, a adoção de jateamento, com a prévia instalação de tela metálica, para obtenção de camada plana, ou de grapas metálicas, para a consecução de revestimentos tipo "contorno". A primeira opção é considerada superior, sendo que, permitindo-se fluxo de ar nos canais formados entre o revestimento e a chapa dobrada, pode-se incrementar o desempenho da proteção.

5.3.6 "Sumaré"

A Sumaré fornece os seguintes produtos para a proteção contra fogo:

- "Pyrocrete 241", que é um material bi-componente, à base de oxí-cloreto de magnésio;
- "Pyrocrete 102", que é um pré-misturado cementoso a seco, com a adição de fibras, e monoccomponente.

Introduziu-se inicialmente no mercado o "Pyrocrete 241", para utilização em plataformas "off-shore". O funcionamento como protetor baseia-se na geração térmica de água propiciada por reações químicas do material em função da elevação de temperatura quando de um incêndio. Apesar do

alto desempenho na proteção contra fogo, a aplicação do material sobre substratos de aço exige um tratamento prévio contra a corrosão, em função do caráter agressivo do mesmo.

O "Pyrocuret 102", pouco menos eficiente quanto à proteção ao fogo, não apresenta este caráter corrosivo, podendo ser aplicado diretamente sobre o aço.

As propriedades indicadas para o "241" e o "102" são, respectivamente:

- resistência à compressão - 3,87 e 14 MPa;
- coeficiente de dilatação térmica - $2,2 \times 10^{-5}$ e 7×10^{-6} m/m x °C;
- condutibilidade térmica - 0,88 e 1,38 N/m x °C.

Após uma mistura com quantidade adequada de água em betoneira, o material é normalmente aplicado por jateamento. Adota-se uma tela de aço galvanizado expandido sobre o substrato, seja para aplicações tipo "caixa" ou "contorno" para melhorar a aderência do material fresco, a qual é fixada, a pinos soldados à base, por meio de arruelas de pressão.

Algumas recomendações quanto à aplicação são as seguintes:

- os pinos são dispostos na forma de uma malha retangular de lados não superiores a 30 cm;
- no encontro entre telas adota-se uma superposição de 10 cm, sendo as mesmas amarradas com arame galvanizado;
- afixam-se ripas de madeira paralelamente e espaçadas de forma a servirem de referência para a espessura do revestimento e de apoio para o serviço de "nivelamento" com sarrafos;
- após a "pega" da argamassa aplicada (por volta de 1 hora) pode-se "desempená-la" com desempenadeira de madeira ou metal sem umedecimento do material.

Em reunião com o Eng^o José Ricardo G. Gonçalves, discutiu-se a posição da empresa quanto ao problema proposto:

1º) o produto indicado seria o "Pyrocuret 102" em aplicação tipo "caixa" conforme indicado na Figura 5.61. Os pinos seriam locados de forma a constituir malha retangular de lados 30 cm longitudinalmente à chapa, e a cada nervura transversalmente à mesma. A aplicação tipo contorno, além de não propícia em função da geometria da chapa estudada, traria dificuldades de dobramento da tela normalmente utilizada (obtida a partir de chapa de 1 mm de espessura).



Figura 5.61 - Solução com "Pyrocrete 102".

2º) a "Sumaré" possui ensaios quanto ao desempenho do "Pyrocrete 241" aplicado sobre anteparas de chapas de aço.

O esquema indicado na Figura 5.62 foi qualificado como corta-fogo durante 1 hora, sendo que na face não exposta ao fogo, a temperatura não se elevou, em relação à ambiente, de 139°C em média, nem de 180°C em um ponto isolado. No entanto, a antepara curvou-se convexamente para o lado do fogo de forma a originar flecha de 2 cm.

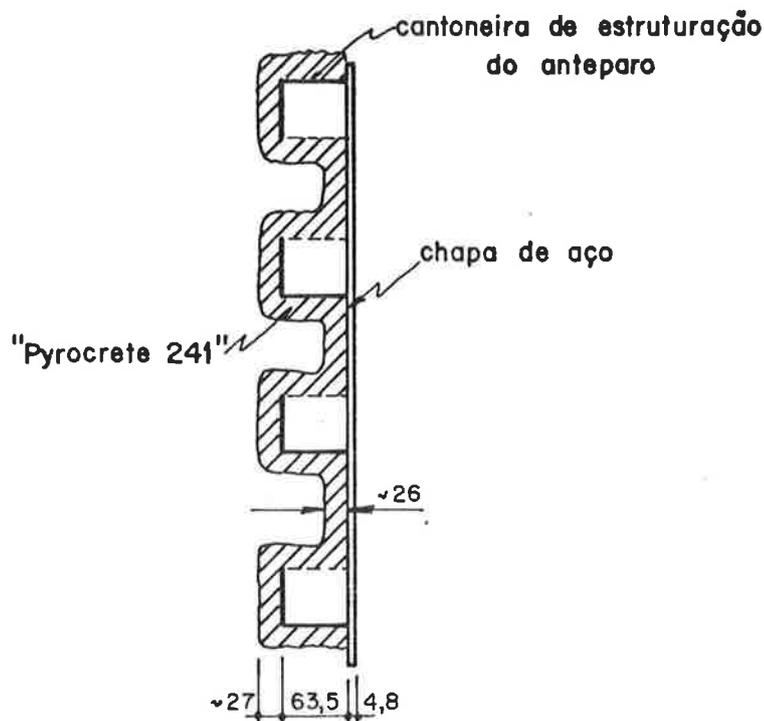


Figura 5.62 - Antepara ensaiada com revestimento com "Pyrocrete 241".

Pode-se considerar uma eventual analogia com a laje composta, bastante perigosa em função da diferença quanto à espessura de chapa, temendo-se a ocorrência de "empenamentos" da chapa dobrada em função de uma maior deformabilidade da mesma.

A Sumaré considerou-se sem dados mais precisos, acreditando na necessidade de ensaios.

3º) quanto a uma eventual aplicação do "Pyrocrete 102", o rendimento teórico para uma espessura de 20 mm é de 1,4 m² de revestimento aplicado por saco de 22,7 kg do produto. Para aplicações sobre-cabeça, as perdas poderiam alcançar 30% a 40%.

6 COMPARAÇÃO ESTIMATIVA DE CUSTOS

A análise da viabilidade de se utilizar um dado sistema de piso na construção de um edifício é um problema bastante complexo e extremamente particular. Complexo na medida em que concorrem inúmeros fatores (alguns até subjetivos); particular enquanto variável de caso para caso, e ao longo do tempo.

Sendo assim, um estudo da viabilidade econômica da laje composta está além dos objetivos deste trabalho. Sua principal contribuição, quanto a este estudo, reside no fato de ter apresentado uma série de características deste sistema não tradicional, permitindo sua participação em futuras avaliações comparativas.

Apenas para não se pecar pela omissão quanto às discussões relativas ao custo da laje composta, aspecto extremamente relevante quanto à sua possível demanda, indica-se a seguir alguns possíveis concorrentes, bem como discute-se algumas análises grosseiras de custos.

6.1 SISTEMAS DE PISO DISPONÍVEIS NO MERCADO NACIONAL

Além dos sistemas convencionais, representados pelas lajes de concreto armado e de concreto protendido, uma série de outros encontram-se disponíveis no mercado nacional. Podem ser classificados (1), entre outros, em:

- lajes pré-moldadas protendidas (Figura 6.1);
- lajes nervuradas (Figura 6.2);
- lajes obtidas a partir de pré-lajes (Figura 6.3);
- lajes de painéis armados de concreto celular (Figura 6.4);
- lajes com painéis compostos de madeira e fibrocimento (Figura 6.5);
- pisos de chapas de aço (Figura 6.6).

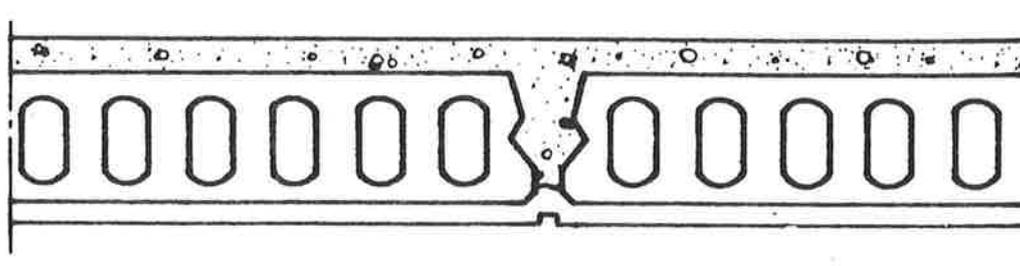


Figura 6.1 - Seção transversal de uma laje constituída com painéis pré-moldados de concreto protendido.

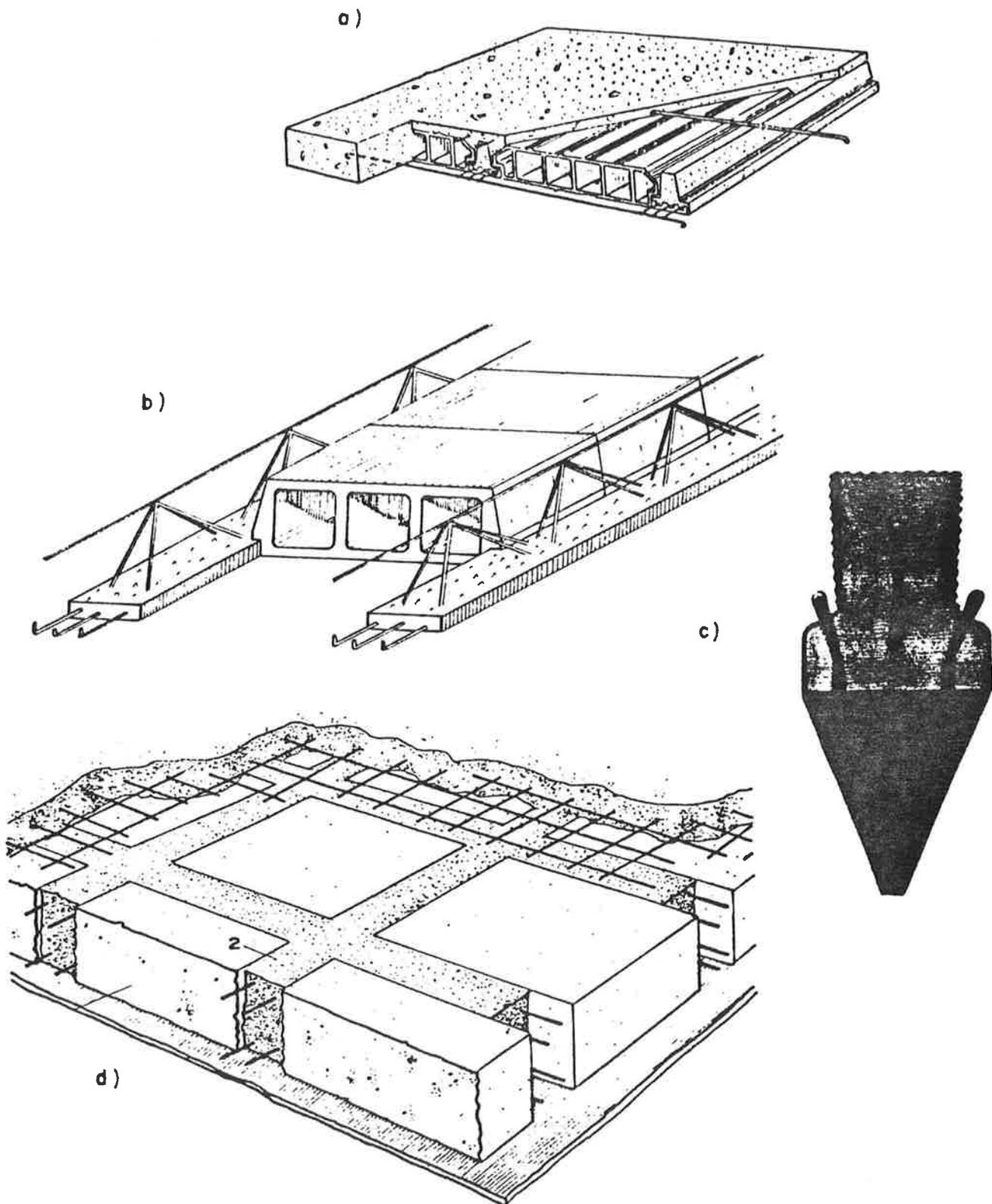


Figura 6.2 - Lajes nervuradas: a) nervuras de concreto armado; b) pré-nervuras de concreto armado; c) nervuras de concreto protendido; d) nervuras moldadas "in loco".

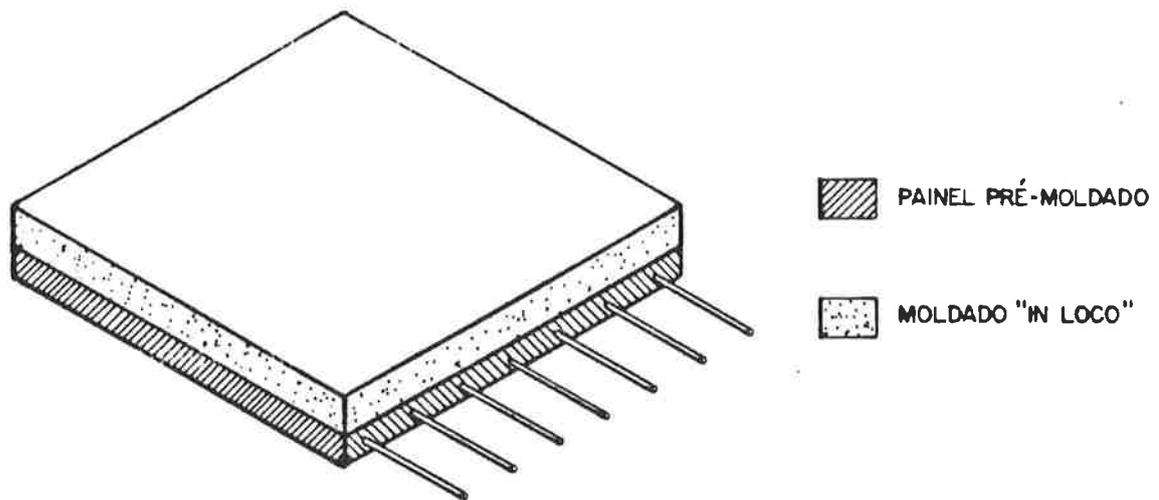


Figura 6.3 - Lajes obtidas a partir de pré-lajes de concreto armado ou protendido.

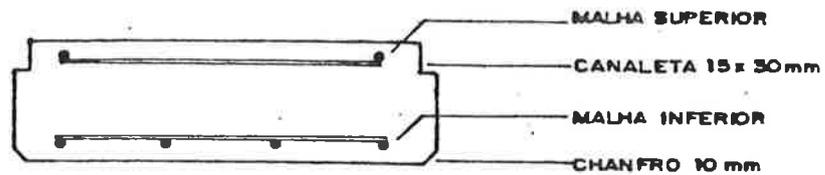


Figura 6.4 - Seção transversal de um painel de concreto celular para confecção de lajes.

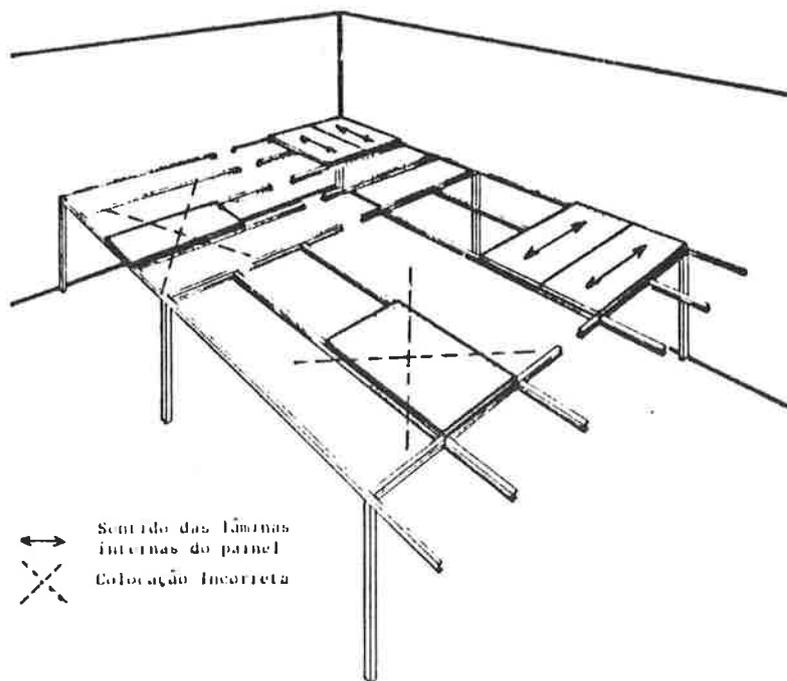


Figura 6.5 - Estruturação e colocação dos painéis compostos de madeira e fibrocimento.

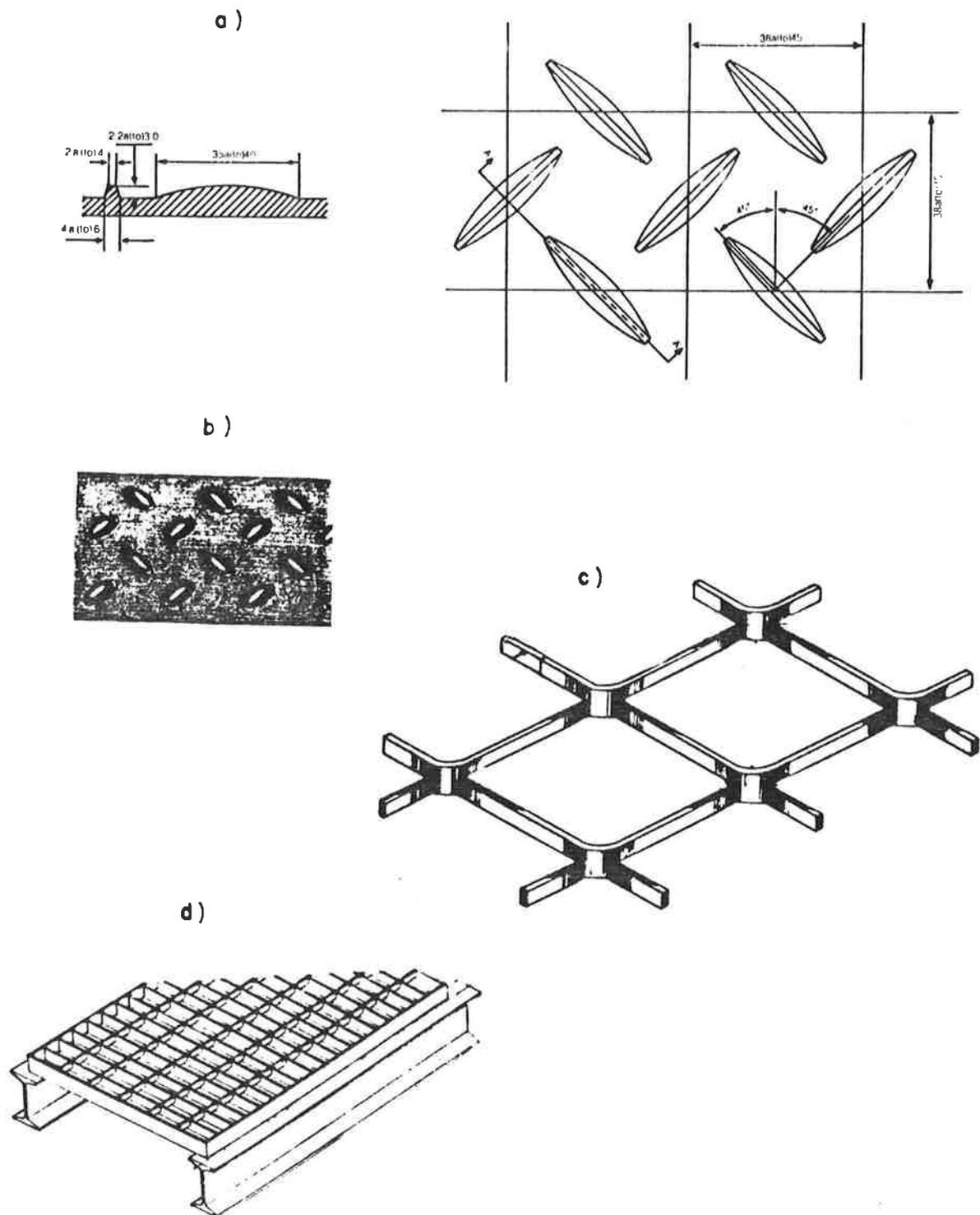


Figura 6.6 - Pisos de aço: a) chapas laminadas; b) chapas recalçadas; c) grades de metal expandido; d) grades de piso.

6.2 A LAJE COMPOSTA COMO OPÇÃO PARA O SISTEMA DE PISO

A análise comparativa entre os vários sistemas está, conforme citado, além dos objetivos deste trabalho. A comparação entre eles abrange inúmeras características além do custo direto do mesmo; alguns dos parâmetros que deveriam ser confrontados nesta análise seriam:

- isolamento térmica;
- comportamento acústico;
- desempenho quanto ao fogo;
- comportamento frente à corrosão;
- influência quanto ao restante da estrutura;
- interferência quanto aos demais subsistemas do edifício;
- velocidade de execução;
- exigências quanto a equipamentos e mão-de-obra;
- estética;
- durabilidade;
- exigências de manutenção;
- etc.

Todos esses aspectos, além dos custos diretos e indiretos e de outros parâmetros não citados, deveriam receber pesos relativos ponderados para uma dada situação em estudo, para que se pudesse chegar a um valor final comparável entre os vários sistemas.

Na falta de estudos com tal abrangência divulgados em nosso país, pode-se indicar os resultados de um levantamento de custos diretos de soluções para lajes de piso realizado em 1986 (31) e revisto em 1987 (122). Em tal trabalho são analisados, para vãos da ordem de 3,5 m e sobrecargas de 200 kg/m², os seguintes sistemas:

- laje de concreto armado convencional;
- laje constituída por painéis pré-moldados de concreto protendido;
- laje nervurada com nervuras pré-moldadas de concreto armado (laje pré);
- laje composta.

Para todos os sistemas foram computados todos os materiais, mão-de-obra e equipamentos para a execução do piso, não se abrangendo os revestimentos de piso. Quanto aos revestimentos de forro, considerou-se a aplicação de chapisco, emboço e reboco à laje pré para que esta pudesse ser considerada comparável às demais.

Para a laje convencional de concreto armado adotou-se dez reaproveitamentos de fôrma, enquanto para o escoramento da laje pré não se estimou reaproveitamento. A laje composta foi considerada sem necessidade de escoramento intermediário quando da execução.

Os resultados finais obtidos foram os seguintes:

- . concreto armado convencional US\$ 15,25/m²;
- . painéis protendidos US\$ 12,95/m²;
- . laje mista US\$ 14,10/m²;
- . laje composta US\$ 13,30/m².

Apesar da natureza de certa forma grosseira desta análise, vislumbra-se a laje composta como um sistema compatível, em termos de custos, com outros sistemas mais comumente utilizados. É portanto uma solução que não deve ser descartada "a priori".

Prosseguindo ainda nesta linha de comparação de custos diretos, analisa-se a seguir as soluções em concreto armado convencional e em laje composta para lajes de dimensões (x, y) onde:

$$x = 2; 3; 4 \text{ m}$$
$$y = x; 1,5 x; 2 x; 3 x$$

O dimensionamento das lajes de concreto armado foi feito segundo a NBR 6118 (26), enquanto para as lajes compostas adotou-se a tabela indicada no catálogo técnico do produto "formalaje" (19).

Na Tabela 6.1 encontram-se indicados os consumos de aço e concreto para ambas as soluções; as seguintes simplificações foram adotadas:

- desprezou-se as perdas por corte e desbitolamento das barras de aço para o concreto armado;
- desprezou-se as perdas por superposição e desbitolamento das chapas de aço para a laje composta;
- desprezou-se as perdas de concreto para ambas as soluções;
- desconsiderou-se outras armaduras, que não as de flexão positivas, para ambas as soluções.

Tabela 6.1 - Consumos de aço e concreto para lajes convencional e composta para diversos vãos.

dimensões da laje (m ²)	concreto armado		laje composta	
	consumo de concreto (m ³ /m ²)	consumo de aço (kg/m ²)	consumo de concreto (m ³ /m ²)	consumo de aço (kg/m ²)
2,0 x 2,0	0,070	0,98	0,075	11,44
2,0 x 3,0	0,070	1,10	0,075	11,44
2,0 x 4,0	0,070	1,26	0,075	11,44
2,0 x 6,0	0,070	1,74	0,075	11,44
3,0 x 3,0	0,070	1,54	0,075	11,44
3,0 x 4,5	0,070	2,17	0,075	11,44
3,0 x 6,0	0,070	2,65	0,075	11,44
3,0 x 9,0	0,070	3,35	0,075	11,44
4,0 x 4,0	0,070	2,80	0,105	11,44
4,0 x 6,0	0,080	3,67	0,105	11,44
4,0 x 8,0	0,090	3,75	0,105	11,44
4,0 x 12,0	0,100	4,12	0,105	11,44

Para a estimativa dos "custos" de cada uma das soluções, adotou-se os seguintes parâmetros (base maio de 1989):

. fôrmas para concreto armado

- custo dos painéis (consulta a fabricantes):
NCz\$ 54,35/m²

- mão-de-obra para montagem e desmontagem (123):
NCz\$ 5,01/m²

. aço para concreto armado

- material (123):
NCz\$ 0,84/kg

- mão-de-obra de armação (123):
NCz\$ 0,35/kg

. concreto

- material usinado (123):
NCz\$ 95,51/m³

- mão-de-obra para aplicação (123):
NCz\$ 22,89/m³

. chapa dobrada para laje composta

- material (consulta a fabricantes):
NCz\$ 2,08/kg

- mão-de-obra para montagem (consulta a aplicadores):
NCz\$ 0,38/m²

Os "custos" determinados podem ser vistos na Tabela 6.2, onde observa-se que o valor final, para as lajes de concreto armado, é função do número de aproveitamentos "n" das fôrmas.

Tabela 6.2 - "Custo" das soluções.

Dimensões da laje (m ²)	Custo da laje de concreto armado (NCz\$/m ²)	Custo da laje composta (NCz\$/m ²)
2,0 x 2,0	14,46 + 54,35/n	33,06
2,0 x 3,0	14,61 + 54,35/n	33,06
2,0 x 4,0	14,80 + 54,35/n	33,06
2,0 x 6,0	15,37 + 54,35/n	33,06
3,0 x 3,0	15,13 + 54,35/n	33,06
3,0 x 4,5	15,88 + 54,35/n	33,06
3,0 x 6,0	16,45 + 54,35/n	33,06
3,0 x 9,0	17,28 + 54,35/n	33,06
4,0 x 4,0	16,63 + 54,35/n	36,61
4,0 x 6,0	18,85 + 54,35/n	36,61
4,0 x 8,0	20,13 + 54,35/n	36,61
4,0 x 12,0	21,75 + 54,35/n	36,61

Fazendo-se a igualdade, para cada vão de laje, do custo da solução em laje composta com a em concreto armado, pode-se determinar o número de utilizações que se têm de fazer das fôrmas para que se tenha soluções equivalentes.

Tabela 6.3 - Número de utilizações ($n_{\text{util}}^{\text{util}}$) das fôrmas para se ter soluções de mesmo "custo".

dimensões da laje (m ²)	$n_{\text{util}}^{\text{util}}$
2,0 x 2,0	2,92
2,0 x 3,0	2,95
2,0 x 4,0	2,98
2,0 x 6,0	3,07
3,0 x 3,0	3,03
3,0 x 4,5	3,16
3,0 x 6,0	3,27
3,0 x 9,0	3,44
4,0 x 4,0	2,72
4,0 x 6,0	3,06
4,0 x 8,0	3,30
4,0 x 12,0	3,66

Observe-se que, com 4 aproveitamentos das fôrmas, já se obtém soluções de "custos" inferiores das lajes convencionais em relação às compostas. Cabe aqui observar que neste último estudo grosseiro de "custos" utilizou-se o preço de mercado da "formalaje", enquanto no estudo anteriormente citado adotou-se, para a chapa de aço dobrada, uma composição de custos baseada no preço de mercado da matéria-prima (chapa plana de aço) e na pesquisa de remuneração que caberia a um fabricante que a conformasse.

Uma demanda mais acentuada do produto, que permita um planejamento mais consistente quanto à sua produção, certamente poderá gerar uma diminuição do seu preço de mercado, tornando-o mais competitivo.

Cabe apenas lembrar que a viabilidade econômica do sistema de piso é, como foi dito, bastante mais ampla que este cômputo de custos diretos.

7 COMENTARIOS FINAIS

Neste trabalho tratou-se a utilização da laje composta sob um enfoque bastante amplo: desde a discussão quanto às possibilidades de um uso mais intenso da chapa de aço na construção civil até a viabilidade técnico-econômica atual do componente para a execução de edifícios.

Cada capítulo, no entanto, possuiu uma certa "vida própria", passando pelo desenvolvimento de um certo tema até as conclusões a seu respeito. Sendo assim, faz-se aqui não um levantamento de conclusões, já que se encontram distribuídas ao longo do texto, mas apenas uma síntese de alguns aspectos relevantes anteriormente tratados quanto à laje composta:

- a matéria-prima é disponível hoje em nosso país;
- estruturalmente a solução é viável;
- a execução é simples e pode gerar uma série de vantagens;
- com os devidos cuidados, dá-se origem a um sistema resistente à corrosão;
- o mesmo se dá quanto à resistência ao fogo;
- o sistema pode ser viável economicamente nas condições atuais, bem como esta viabilidade pode ser incrementada na medida em que se invista no produto.

Portanto, o prosseguimento dos estudos a este respeito, tratando-se mais a fundo cada um dos aspectos discutidos, pode ser bastante interessante.

Procurou-se, com este trabalho, reunir-se informações sobre a laje composta, contribuindo para se tentar quebrar um círculo vicioso bastante frequente na análise de novos produtos para a construção civil:



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SOUZA, U.E.L. Sistemas de piso para edifícios de aço. São Paulo, EPUSP/FDTE/COSIPA, 1988. 120 p.
- (2) SOUZA, U.E.L. & LICHTENSTEIN, N.B. Conceitos básicos de racionalização das formas. In: Anais do III simpósio nacional de tecnologia da construção - formas para estruturas de concreto. São Paulo, EPUSP, 1986. p. 119-40.
- (3) BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio. Consider. Anuário estatístico (setor metalúrgico). Brasília, IBS, 1988. 188 p.
- (4) CLARET, A.M. Palestra de abertura. In: Anais do congresso anual da Associação Brasileira da Construção Metálica. São Paulo, ABCEM, 1986. p. 1-4.
- (5) ASP. A siderurgia privada em 1984. Rio de Janeiro, IBS, 1985. 86 p.
- (6) ABCEM. Relatório do ano de 1986. São Paulo, 1987. 17 p.
- (7) BELLEI, I.H. A indústria siderúrgica brasileira. In: Encarte aço na construção. São Paulo, PINI, 1986. p. 5-6.
- (8) SOUZA, U.E.L. As estruturas de aço na construção civil. In: Anais do IV simpósio nacional de tecnologia da construção - sistemas pré-moldados para construção de edifícios industriais e habitacionais. São Paulo, EPUSP, 1987. p. 192-200.
- (9) ABIKO, A.K. & HELENE, P.R.L. Cimento portland. São Paulo, EPUSP, 1986. 65 P.
- (10) BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5950: Part 4 - Structural use of steelwork in building. London, 1982. 22 p.
- (11) NITTETSU. Catálogo geral - deck plate. Japão, 1984. 22 p.
- (12) ----- . Catálogo - super E deck/E deck. Japão, 1984. 23 p.
- (13) ----- . Manual de projeto - deck plate. Japão, 1984. 60 p.

- (14) _____. Deck plate - informações técnicas. Japão, 1984. 76 p.
- (15) _____. Nittetsu deck floor - manual de execução. Japão, 1984. 60 p.
- (16) PAB. Gamme des fabrications - products range. Paris. 13 p.
- (17) PEVA. Peava 45 concrete floor sheel - recommendations for the design. 1982. 42 p.
- (18) PMF. Profiles for concrete for fast, Long span flooring and roofing. Inglaterra. 14 p.
- (19) PERKROM. Catálogo formaleje. São Paulo. 8 p.
- (20) SOUZA, U.E.L. & CARDOSO, F.F. Desenvolvimento de lajes mistas concreto-chapa de aço dobrada. Análise preliminar do produto - levantamento de dados. São Paulo, EPUSP/FDTE/COSIPA, 1986. 33 p.
- (21) SILVA, D.F. Comportamento de placas compostas. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1987. 104 p.
- (22) PORTER, M.L. & EKBERG, C.E. Design recommendations for steel deck floor slabs. In: Journal of the structural division. ASCE, 102: 2121-36, 1976.
- (23) FUSCO, P.B. Fundamentos do projeto estrutural. São Paulo, Mc Graw-Hill, 1976. 298 p.
- (24) PORTER, M.L. & EKBERG, C.E. Behavior of steel - deck - reinforced slabs. ASCE, 103: 663-77, 1977.
- (25) ABNT. NBR 8800 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. São Paulo, 1986. 200 p.
- (26) _____. NBR 6118 - Projeto e execução de obras de concreto armado. São Paulo, 1978. 76 p.
- (27) _____. NBR 6119 - Cálculo e execução de lajes mistas. São Paulo, 1980. 4 p.
- (28) PORTER, M.L. Analysis of two-way acting composite. ASCE, 111: 1-18, 1985.
- (29) CONSTRADO. European recommendations for steel construction - the design of composite floors with profiled steel sheet. London, ECCS/SCI/Constrado, 1975. 77 p.

- (30) PORTER, M.L. et alii. Shear-bond analysis of steel-deck-reinforced slabs. ASCE, 102: 2255-68, 1976.
- (31) SOUZA, U.E.L.; CARDOSO, F.F.; LINDENBERG, H. Desenvolvimento de lajes mistas concreto - chapa de aço dobrada. Análise preliminar do produto - Estudo de viabilidade técnico-econômica. São Paulo, EPUSP/FDTE/COSIPA, 1986. 83 p.
- (32) NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto. 1 ed., São Paulo, PINI, 1982. 738 p.
- (33) ABNT. NBR 5903 - Produtos planos laminados de aço. São Paulo, 1983. 11 p.
- (34) LEAL, F.L. Siderurgia. Belo Horizonte, USIMINAS, 1979. 102 p.
- (35) PERKROM. Telhas pré-pintadas. São Paulo. 24 p.
- (36) ROLL-FOR. Catálogo de produtos. Guarulhos. 6 p.
- (37) EUCATEX. Sistemas de coberturas e fechamentos. São Paulo, 1987. 6 p.
- (38) BRAFÉR. Sistemas de cobertura e tapamento. Belo Horizonte, 1987. 36 p.
- (39) ABIKO, A.K. & YOSHIMOTO, E. Telhas de aço galvanizadas - investigação preliminar. São Paulo, EPUSP/ABCEM. 1987. 71 p.
- (40) SOUZA, U.E.L. & CARDOSO, F.F. Sistema com fôrma metálica incorporada. In: II simpósio nacional de tecnologia da construção - fôrmas para estruturas de concreto. São Paulo, EPUSP, 1986. p. 161-70.
- (41) REVISTA A CONSTRUÇÃO. São Paulo, PINI, nº 2149, 1989.
- (42) CHADE, W.T. O uso da madeira na construção civil - A evolução da fôrma para concreto. In: II simpósio nacional de tecnologia da construção. São Paulo, EPUSP, 1986. p. 1-11.
- (43) ABNT. NBR 7480 - Barra e fio de aço destinados a armaduras para concreto armado. São Paulo, 1982. 15 p.
- (44) LICHTENSTEIN, N.B. Formulação de modelo para o dimensionamento do sistema de transporte em canteiro de obras de edifícios de múltiplos andares. Tese de doutorado. São Paulo, EPUSP, 1987. 268 p.

- (45) INSTAPANEL. Catálogo - placas colaborantes. Argentina. 11 p.
- (46) GAVLE. Products for the building industry. 41 p.
- (47) SOUZA, U.E.L. Sistemas de vedações para edifícios de aço. São Paulo, EPUSP/FDTE/COSIPA, 1988. 158 p.
- (48) AÇOMINAS. Edifícios de andares múltiplos. Belo Horizonte, 1979. 104 p.
- (49) UHLIGH, H.H. Corrosion and corrosion control. New York, John Wiley, 1963. 371 p.
- (50) TANAKA, Deniol K. Corrosão e proteção contra corrosão de metais. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1979. 280 p.
- (51) ADAM, A.M. PQI 760 - Corrosão e processos de proteção em materiais metálicos. Notas de aula de curso de pós-graduação da EPUSP. São Paulo, s. ed.
- (52) DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Corrosão. São Paulo, s. ed., s. d. 44 p.
- (53) HELENE, P.R.L. Corrosão em armaduras para o concreto armado. São Paulo, PINI, 1986. 47 p.
- (54) MASTERTON, William L. & SLOWINSKI, Emil J. Química geral superior. 1 ed., Rio de Janeiro, Interamericana, 1978. 583 p.
- (55) BRAUNSTEIN, Adolphe & NETO, Antonio Amaral. Tecnologia de combate à corrosão. Anquitiva/Tintas Coral, 1975. 102 p.
- (56) VAN VLACK, Lawrence H. Princípios de ciência dos materiais. São Paulo, Edgard Blucher, 1983. 427 p.
- (57) WEST, J.M. Electrodeposition and corrosion processes. 2 ed., London, Van Nostrand Reinhold, 1971. 206 p.
- (58) WRANGLÉN, Gosta. An introduction to corrosion and protection of metals. Stockholm, Institut for Metallskydd, 1972. 285 p.
- (59) USIMINAS. Corrosão atmosférica; fascículo de informação técnica. s.n.t. 36 p.
- (60) FONTANA, Mars G. & GREENE, Norbert D. Corrosion engineering. New York, Mc Graw-Hill, 1967. 391 p.

- (61) HELENE, P.R.L. Estrutura interna do concreto. São Paulo, PCC-EPUSP, s.d. 69 p.
- (62) NEVILLE, Adam M. Propriedades do concreto. 1 ed., São Paulo, PINI, 1982. 738 p.
- (63) WOLYNEC, S. Corrosão de tubos galvanizados empregados na construção civil. In: Separata dos encartes 25 e 48 do DEd-IPT. São Paulo, PINI, 1985. (28).
- (64) BOYD, W.K. & FINK, F.W. Corrosion of metals in the atmosphere. In: Metals and ceramics information center. MCIC Report. Columbus, number 74-23, August 1974. 77 p.
- (65) ROZENFELD, I.L. Atmospheric corrosion of metals. Houston, National Association of Corrosion Engineers, 1972. 229 p.
- (66) PLUDEK, V.R. Design of corrosion safe structures. In: Good painting practice. 2 ed. Pittsburgh, SSPC, s.d.
- (67) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROÇÃO. Anais do 2º seminário nacional de corrosão na construção civil. Rio de Janeiro, 1986. 204 p.
- (68) NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. Industrial maintenance painting. 4 ed., Houston, 1981.
- (69) WEISMANTEL, G.E. Paint handbook. New York, Mc Graw-Hill, 1981. 619 p.
- (70) FRASER, R.A. Painting of railroad bridges and structures. In: Good painting practice. 2 ed. Pittsburgh, SSPC, s.d.
- (71) BRITISH STANDARDS INSTITUTE. BS 5493/Appendix A - General principles of corrosion and its control. London, 1977. 10 p.
- (72) DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 55928/part 2 - Corrosion protection of steel structures by organic and metallic coatings. Berlin, 1979. 6 p.
- (73) NIPPON STEEL CORPORATION. Atmospheric corrosion resistant steels. 19 p.
- (74) VIANNA, Ruth de Oliveira. Características e aplicações dos aços patináveis. Boletim técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, 4º Trim: 1-7, out. 1981.
- (75) HOLANDA, A.B. Novo dicionário da língua portuguesa. 1 ed. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, s.d.

- (76) MARCONDES, L. et alii. Aços resistentes à corrosão atmosférica na construção civil. In: Anais do 2º seminário nacional de corrosão na construção civil. Rio de Janeiro, ABRACO, 1986. p. 138-46.
- (77) REVISTA DO INSTITUTO DE ENGENHARIA. São Paulo, n. 454, dez 1985. 64 p.
- (78) COSIPA. Aços Cosipa soldáveis de alta resistência à corrosão atmosférica - COS-AR-COR. 18 p.
- (79) USIMINAS. Usi-sac; aços resistentes à corrosão atmosférica. 1984. 19 p.
- (80) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROÇÃO. Anais do 14º seminário nacional de corrosão. São Paulo, 1987. 2 v.
- (81) COSIPA. Cos-Ar-Cor 400. 2 p.
- (82) CSN. Catálogo de produtos. 1980. 151 p.
- (83) LANDI, F.R. O conforto térmico na habitação. São Paulo, PCC/EPUSP, 1977.
- (84) SOUZA, U.E.L. et alii. A proteção da estrutura de aço dos edifícios contra a corrosão. São Paulo, EPUSP/FDTE/COSIPA, 1988. 262 p.
- (85) HORVICK, E.W. Hot dip galvanizing. In: Good painting practice. 2 ed. Pittsburgh, SSPC, s.d.
- (86) WOLYNEC, S. Zincação por imersão a quente. São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1977. 381 p.
- (87) FILHO, E.B. Aplicação de produtos zincados por imersão a quente. In: Zincação por imersão a quente. São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1977. : 1.1-1.22.
- (88) INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DO CHUMBO, NÍQUEL E ZINCO. Anais do I simpósio sobre produtos galvanizados. Belo Horizonte, Consider/ABM, 1979. 2 v.
- (89) ----- Manual de galvanização. 1 ed., São Paulo, 1979. 47 p.
- (90) CHILDS, J.N. & DECHSLE, S.J. Thermal sprayed coatings. In: Good painting practice. 2 ed. Pittsburgh, SSPC, s.d.
- (91) NACE. Miscellaneous coatings and their uses. In: Industrial maintenance painting. 4 ed. Houston, 1981.

- (92) BAILEY, J.C. Corrosion protection of welded steel structures by metal spraying. In: Welding Institute of Canada. 11th international thermal spraying conference. Montreal, 1986. p. 1-15.
- (93) METCO. Catálogo de produtos.
- (94) GNECCO, Celso. Pintura de manutenção industrial. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1984. 73 p.
- (95) LIE, T.T. Fire and buildings. London, Applied Science, 1972.
- (96) NATIONAL COMMISSION ON FIRE PREVENTION AND CONTROL. America burning. Washington, U.S. Government, 1973.
- (97) HARMATHY, T.Z. Design of buildings for fire safety - part I. In: NFPA. Fire Technology. Boston, 1976. vol. 12-2.
- (98) SECCO, D. Normalização. In: IV simpósio nacional de instalações prediais - sistemas de proteção e combate a incêndios. São Paulo, PCC/EPUSP, 1987.
- (99) BERTO, A.F. Proteção contra incêndio de estruturas de aço. In: Tecnologia de edificações. São Paulo, PINI, 1988. p. 407-12
- (100) LANDI, F.R. Desempenho de materiais e projeto de edifícios com relação a incêndio. São Paulo, EPUSP.
- (101) ROSSO, T. O uso da vermiculita na proteção contra o fogo. s.n.t.
- (102) LANDI, F.R. A ação do fogo sobre as estruturas metálicas. In: Os edifícios de estrutura metálica; anais do seminário. São Paulo, jun. 86. p. 123-64.
- (103) NFPA. Fire protection handbook. 14 ed., Boston, 1976.
- (104) LATERZA, L.B.M. Formulação de modelo computacional para a análise de redes de hidrantes; dissertação de mestrado. São Paulo, EPUSP, 1987.
- (105) ISO - 834 - 4
- (106) ABNT. NBR 5628 - Componentes construtivos estruturais - determinação da resistência ao fogo. São Paulo, 1980.
- (107) MALHOTRA, H.L. Design of fire-resisting structures. 1 ed. London, Surrey University, 1982.

- (108) HART, F. et alii. El atlas de la construcción metálica. Barcelona, Gustavo Gilli, 1976.
- (109) SOUZA, U.E.L. et alii. Previsão do comportamento do incêndio e exigências de resistência ao fogo dos edifícios de aço. In: Anais do congresso ABCEM-ABIPE de 1987. Rio de Janeiro, 1987. 32 p.
- (110) JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE FRANÇAISE. Sécurité contre l'incendie. Paris. Journaux Officiels, 1979-80.
- (111) SCHULTZ, N. Fire and flammability handbook. New York, Van Nostrand Reinhold, 1985.
- (112) ABNT. NBR 5627 - Exigências particulares para as obras de concreto armado e protendido. São Paulo, 1980.
- (113) HIRSCHFELD, H. Código de edificações. 7 ed. São Paulo, Atlas, 1987.
- (114) IRB. Tarifa de seguro incêndio do Brasil. São Paulo, 1978.
- (115) CSTB. Méthode de prévision par el calcul du comportement au feu des structures en acier. In: Cahiers du CSTB. Paris, 1976. 43 p.
- (116) BERTO, A.F. Tratamento superficial de estruturas de aço - proteção contra incêndio. In: Universidade Mackenzie. Utilização do aço na construção civil; anais do simpósio. São Paulo, maio 84.
- (117) ALMEIDA, D.F.A. As estruturas de concreto armado e o fogo. Dissertação de mestrado. São Paulo, EPUSP, 1983.
- (118) NEWMAN, G.M. & WALKER, H.B. Steel framed multi-storey buildings - design recommendations for composite floors and beams using steel decks - section 2 - fire resistance. Constrado, 1983. 20 p.
- (119) CIRIA. Fire resistance of ribbed concrete floors. London, 1985. Report 107, 45 p.
- (120) PRZETAK, L. Standard details for fire-resistive building construction. New York, Mc Graw-Hill, 1977. 365 p.
- (121) EUCADEX. Catálogo do produto isopiro. 2p.

- (122) CARDOSO, F.F. & SOUZA, U.E.L. A utilização da laje mista concreto-chapa de aço dobrada na construção de edifícios. In: Anais do seminário latinoamericano sobre uso do aço na construção. Belo Horizonte, ABCEM/ILAFSA/SIDERBRAS/UFOP, 1987. p. 257-94.
- (123) REVISTA A CONSTRUÇÃO. São Paulo, PINI.

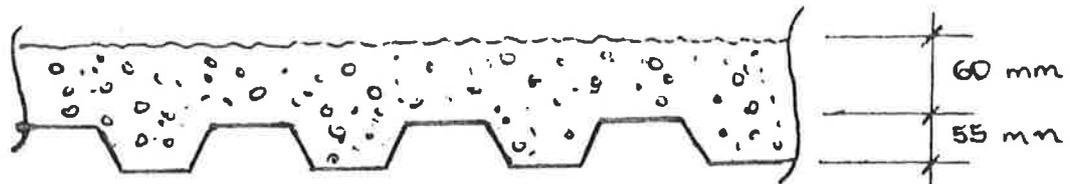
ANEXO

Carta enviada a fabricantes de materiais e componentes passíveis de utilização na proteção contra o fogo da laje composta.

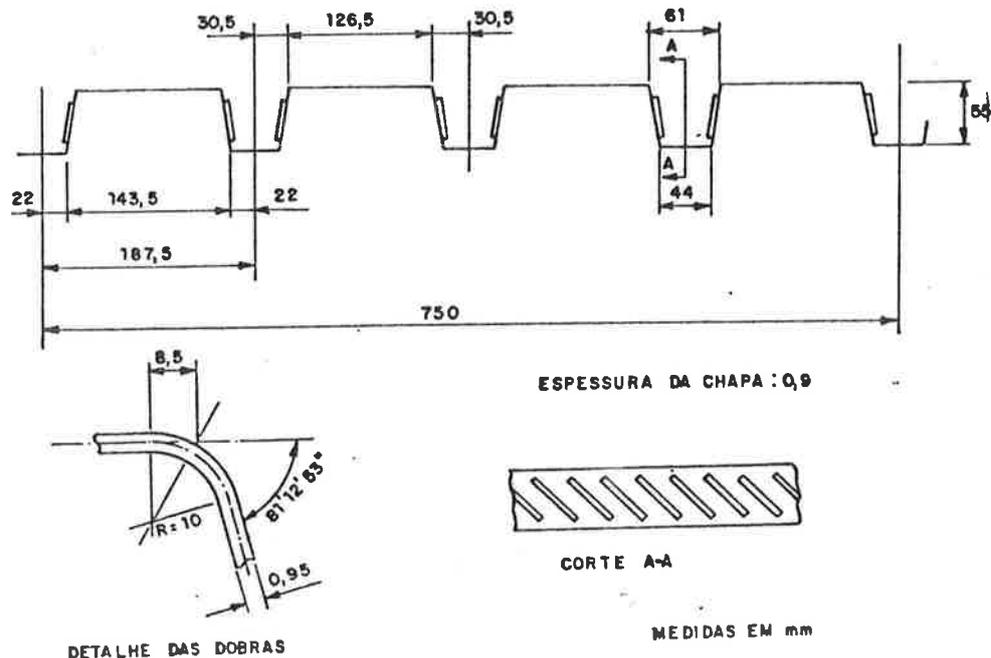
ESTUDO DA PROTEÇÃO CONTRA FOGO DE LAJE COMPOSTA CONCRETO-CHAPA DE AÇO DOBRADA

1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

- A Laje



- A Chapa de Aço



- Casos a serem estudados:

- quanto à resistência ao fogo: 1; 1 1/2; 2; 4 h.
- quanto aos vãos da laje: 3,0; 3,5; 4,0 m.

2. INFORMAÇÕES SOLICITADAS

- esquema(s) de proteção - descrição e fundamentação.
- técnica de execução - inclui equipamentos e materiais complementares necessários.
- consumo de materiais e mão-de-obra.
- composição de custos por m².