

PROJETO DE PAINÉIS SANDUÍCHE DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO

FERNANDO JUFAT CAVALCANTI DA FONSÊCA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Bento de Hanai

**DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

São Carlos

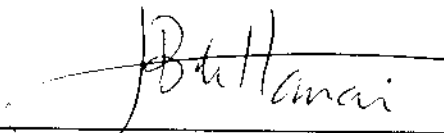
1994

Class.
... A ...
...
...

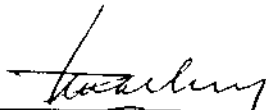
F744p	Fonseca, Fernando Jufat Cavalcanti da Projeto de painéis sanduíche de concreto pré-moldado / Fernando Jufat Cavalcanti da Fonseca.-- São Carlos, 1994. 172 p. Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1994 Orientador : Prof. Dr. João Bento de Hanai 1. Concreto pré-moldado. 2. Painéis sanduíche. 1. Título
-------	---

FOLHA DE APROVAÇÃO

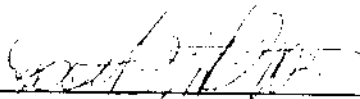
Dissertação defendida e aprovada em 29/11/1994
pela Comissão Julgadora:



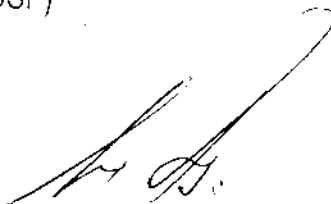
Prof. Dr. JOÃO BENTO DE HANAI (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)



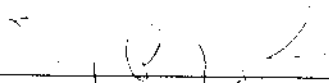
Prof. Dr. ELOY FERRAZ MACHADO JUNIOR
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)



Prof. Dr. ROBERT CHÚST DE CARVALHO
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)



Presidente da CPG
Prof. Dr. Jurandyr Povinelli



Coordenador da Área
Prof. Dr. SÉRGIO PERSIVAL BARONCINI PROENÇA

**A meus pais,
pela minha formação.**

Agradecimentos

Ao Professor João Bento de Hanai pela orientação no desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Mounir Khalil El Debs pela colaboração e sugestões no início deste trabalho.

À Sra. Maria Nadi Minatel pela constante colaboração na pesquisa bibliográfica.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Estruturas da EESC-USP que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tabelas.....	iv
Lista de Símbolos.....	vi
Resumo.....	x
Abstract.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivo.....	4
1.3 Apresentação do trabalho.....	4
2 TIPOLOGIA.....	6
2.1 Introdução.....	6
2.2 Histórico.....	7
2.3 Componentes.....	10
2.4 Comportamento estrutural.....	11
2.5 Placas.....	15
2.6 Isolantes.....	20
2.7 Conectores.....	29
2.8 Sistemas construtivos com painéis sanduíche.....	47
3 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	56
3.1 Introdução.....	56
3.2 Condições de projeto.....	57
3.3 Condições de serviço.....	63
3.4 Momento de inércia.....	69
3.5 Estado Limite de Utilização.....	71
3.6 Estado Limite Último.....	76

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	91
4.1 Introdução.....	91
4.2 Estudo do comportamento estrutural de painéis	
MONOLITE/CABRINI na flexão simples.....	92
4.3 Estudo do comportamento na flexão de painéis sanduíche	
com conectores rígidos de treliça metálica.....	112
4.4 Estudo do comportamento na flexão de painéis sanduíche	
com disposição variada de conectores.....	121
 5 LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS.....	 131
5.1 Introdução.....	131
5.2 Vinculação.....	132
5.3 Ligações em painéis estruturais.....	132
5.4 Ligações de cisalhamento.....	133
5.5 Ligações de compressão.....	141
5.6 Detalhes construtivos.....	144
 6 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS.....	 145
6.1 Introdução.....	145
6.2 Transmissão de calor em regime permanente e regime transitório.....	146
6.3 Propriedades térmicas.....	147
6.4 Controle da condensação.....	160
 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO.....	 165
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 168

Lista de Figuras

FIGURA 1 – Sistema pioneiro de painel sanduíche (COLLINS, 1954).....	8
FIGURA 2 – Representação dos elementos constituintes do painel sanduíche.....	10
FIGURA 3 – Distribuição de tensões nas placas segundo o comportamento estrutural.....	13
FIGURA 4 – Painéis fabricados pela empresa FABCON Inc.....	13
FIGURA 5 – Diagrama momento x flecha segundo a espessura do painel.....	18
FIGURA 6 – Diagrama momento x flecha segundo o tipo de isolante.....	21
FIGURA 7 – Disposição longitudinal recomendada para as emendas das folhas de isolante.....	27
FIGURA 8 – Configurações das barras dobradas como conector rígido concentrado.....	30
FIGURA 9 – Chapa de metal expandida.....	31
FIGURA 10 – Luva plana.....	32
FIGURA 11 – Configurações diversas para conectores rígidos em 1 direção contínuos.....	33
FIGURA 12 – Conectores de barra espacial.....	34
FIGURA 13 – Luva cilíndrica.....	35
FIGURA 14 – Configurações dos conectores flexíveis de metal.....	37
FIGURA 15 – Conectores flexíveis de plástico.....	38
FIGURA 16 – Painéis com nervuras como conector rígido.....	39
FIGURA 17 – Painéis com blocos de concreto como conector rígido.....	40
FIGURA 18 – Disposição dos conectores flexíveis.....	42
FIGURA 19 – Disposição dos conectores em painéis nervurados não-compostos.....	43
FIGURA 20 – Disposição de conector rígido em duas direções para painéis não-compostos.....	44
FIGURA 21 – Disposição de conector rígido em uma direção para painéis não-compostos.....	44

FIGURA 22 - Disposição da “caixa de papelão” no painel de CHANG.	51
FIGURA 23 - Representação esquemática do sistema apresentado por NICHOLLS (1991).	53
FIGURA 24 - Painel STUCANET.	55
FIGURA 25 - Passos do cálculo de tensão e deformação em painéis sanduiche compostos (EINEA et al., 1991).	66
FIGURA 26 - Esforços decorrentes da restrição intermediária no painel.	68
FIGURA 27 - Esforços decorrentes da restrição nos apoios do painel.	68
FIGURA 28 - Trecho resistente em painéis sujeitos a carga concentrada.	70
FIGURA 29 - Seção típica de painel sanduiche com largura unitária.	77
FIGURA 30 - Representação dos esforços no painel.	78
FIGURA 31 - Diagrama de interação para $\beta_e = 1/3$.	84
FIGURA 32 - Diagrama de interação para $\beta_e = 1/4$.	85
FIGURA 33 - Representação da vinculação dos painéis para avaliação de l_e .	87
FIGURA 34 - Características gerais do pré-painel de poliestireno + telas.	93
FIGURA 35 - Dimensões reais da seção transversal dos modelos.	94
FIGURA 36 - Esquema de carregamento e instrumentação dos modelos.	95
FIGURA 37 - Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (painel 1).	100
FIGURA 38 - Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (painel 2).	101
FIGURA 39 - Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (painel 3).	101
FIGURA 40 - Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (painel 4).	102
FIGURA 41 - Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (painel 5).	102
FIGURA 42 - Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (painel 6).	103
FIGURA 43 - Vista de um painel nos últimos estágios de carregamento.	104

FIGURA 44 – Deslocamento relativo típico nos painéis 4,5 e 6.....	104
FIGURA 45 – Vista da seção do pré-painel.....	104
FIGURA 46 – Geometria dos painéis ensaiados por BUSH & STINE (1994).....	113
FIGURA 47 – Geometria da treliça metálica.....	114
FIGURA 48 – Modelo tipo “Pushout”	114
FIGURA 49 – Diagrama carga x deslocamento para painéis da série de produção..	117
FIGURA 50 – Diagrama carga x deslocamento para painéis da série modificada....	117
FIGURA 51 – Variação da rigidez nos ensaios cíclicos	118
FIGURA 52 – Diagrama momento x flecha segundo o tipo de conector.....	127
FIGURA 53 - Tipos de painéis nervurados estudados por PFEIFER & HANSON.	128
FIGURA 54 – Diagrama momento x flecha para os painéis nervurados.....	129
FIGURA 55 – Tipos de ligação de cisalhamento (CEB, 1985).....	133
FIGURA 56 – Ligação segundo a proteção da região de preenchimento.....	134
FIGURA 57 – Geometria das chaves de cisalhamento (CEB, 1985).....	135
FIGURA 58 - Ligação de topo entre dois painéis contidos no mesmo plano.....	135
FIGURA 59 – Ligação de canto entre painéis.....	136
FIGURA 60 – Posição da armadura concentrada na cinta dos painéis.....	136
FIGURA 61 – Comprimento da ligação em painéis com aberturas.....	137
FIGURA 62 – Ligação de canto com painel sujeito à flambagem.....	139
FIGURA 63 – Tipos de ruptura em ligações com chaves.	140
FIGURA 64 - Ligações de compressão : a-e : estreitas; d-e : largas.....	141
FIGURA 65 – Gradiente de temperatura em painéis sanduíche segundo o regime de transmissão de calor: (a) permanente; (b) transitório....	146
FIGURA 66 - Geometria do painel exemplo.....	152
FIGURA 67 – Representação gráfica do gradiente de temperatura.....	158
FIGURA 68 – Gradiente de pressões na espessura do painel.....	164

Lista de Tabelas

TABELA 1 – Características dos isolantes para painéis sanduíche	24
TABELA 2 -- Especificações dos painéis utilizados nos Estados Unidos.....	47
TABELA 3 – Coeficientes de majoração de cargas estáticas para consideração de forças dinâmicas na desfôrma de painéis.....	59
TABELA 4 - Coeficientes de segurança para esforços temporários.....	60
TABELA 5 – Abertura máxima de fissuras segundo o ACI 318-89.....	75
TABELA 6 - Dimensões reais da seção transversal dos modelos.....	95
TABELA 7 - Resultado dos ensaios de flexão no painel 1 (M/V 95).....	97
TABELA 8 -- Resultado dos ensaios de flexão no painel 2 (M/V 70).....	97
TABELA 9 – Resultado dos ensaios de flexão no painel 3 (M/V 120).....	98
TABELA 10 –Resultado dos ensaios de flexão no painel 4 (M/V 120).....	98
TABELA 11– Resultado dos ensaios de flexão no painel 5 (M/V 95).....	99
TABELA 12 -Resultado dos ensaios de flexão no painel 6 (M/V 70).....	99
TABELA 13 - Características mecânicas dos painéis	106
TABELA 14 - Relação entre momentos fletores de fissuração.....	107
TABELA 15 –Equações carga / flecha (Estádio I).....	108
TABELA 16 –Comparação dos momentos resistentes últimos.....	110
TABELA 17 –Detalhes dos modelos ensaiados por BUSH & STINE (1994).....	113
TABELA 18 –Simulação de variação de temperatura para painéis (carga cíclica).....	116
TABELA 19 –Compáração dos momentos resistentes em relação ao painel composto.....	118
TABELA 20 –Detalhes dos modelos ensaiados por PFEIFER & HANSON.....	122
TABELA 21 -Resultado dos ensaios de flexão de PFEIFER & HANSON.....	125
TABELA 22 –Coeficientes de segurança para a fissuração em painéis sanduíche submetidos a ação do vento.....	130

TABELA 23 – Coeficientes β_1 , β_2 e β_3 para ligações segundo a distribuição da armadura.....	138
TABELA 24 – Coeficientes de segurança (γ_d) para ligações contínuas de cisalhamento.....	138
TABELA 25 – Valores para η_i	143
TABELA 26 – Valores para γ_d , γ_{nl}	143
TABELA 27 – Coeficientes de condutividade térmica dos materiais.....	148
TABELA 28 – Valores para resistências térmicas superficiais.....	149
TABELA 29 – Valores para a permeabilidade (McCALL, 1988).....	150
TABELA 30 – Resistência à passagem do vapor de materiais impermeabilizantes...	159
TABELA 31 – Ponto de orvalho em °C para pressão de 760 mm Hg.....	161

Lista de Símbolos

A	área média efetiva em torno de cada barra (cm^2)
A_c	área bruta da seção
A_{cc}	área da seção comprimida
A_{cr}	área da seção de concreto considerada na fissuração
A_l	área da seção transversal da ligação
A_{kex}	área da chave de cisalhamento
A_{ks}	área sujeita a esmagamento na chave de cisalhamento
A_s	área da armadura de uma placa
A_{wall}	área da seção transversal do painel que serve de apoio
C	coeficiente de dilatação térmica do concreto
E_c	módulo de elasticidade do concreto
E_t	módulo de elasticidade modificado para considerar o intervalo de tempo
E_s	módulo de elasticidade do aço
EI	rigidez corrigida para verificação do efeito de 2ª ordem
Fr	resultante da tensão necessária para produzir a deformação ϵ_t
I_c	momento de inércia do painel composto
I_g	momento de inércia da peça não fissurada (composto ou não-composto)
I_{nc}	momento de inércia do painel não-composto
M_d	momento fletor de cálculo
M_k	momento de serviço
M_n	momento resistente último
M_t	momento de fissuração
$M_{t,exp.}$	momento de fissuração experimental
$M_{t,teórico}$	momento de fissuração teórico
$M_{u,exp.}$	momento resistente último experimental
$M_{u,teo.}$	momento resistente último teórico
M_x	momento na direção x
M_y	momento na direção y

M_{2d}	momento de 2ª ordem segundo a NBR-6118
N_d	esforço normal de cálculo
P	permeabilidade
P_o	valor da carga axial para excentricidade zero (efeito de 2ª ordem)
P_v	pressão do vapor
P_u	valor de projeto da carga axial (efeito de 2ª ordem)
R	resistência térmica
R_{ac}	resistência térmica acumulada
R_{cc}	resultante da compressão no concreto
$R_{c,d}$	resistência da ligação de compressão
$R_{j,d}$	resistência da ligação de cisalhamento
R_{st}	resultante de tração na armadura
R_v	resistência à passagem do vapor
R_{total}	resistência térmica total
T_e	temperatura externa
T_i	temperatura interna
T_n	temperatura num ponto dado
T_o	temperatura equivalente ao ponto de orvalho
U	coeficiente global de transmissão de calor
V_d	esforço normal de cálculo, igual a N_d
$W_{x,comp}$	módulo de resistência considerando comportamento composto
$W_{x,noncomp}$	módulo de resistência considerando comportamento não-composto
Z_g	distância de R_{cc} à borda mais comprimida
b	largura do painel
c	cobrimento da armadura (h-d)
d	altura útil da peça
d_i	distância do C.G. da armadura ao C.G. do painel
e	excentricidade
f_{ck}	resistência à compressão do concreto (NBR-6118)
f'_c	resistência à compressão do concreto (ACI 318-89)
f_t	resistência à tração do concreto (ACI 318-89)

f_{ik}	resistência à tração do concreto (NBR-6118)
f_s	tensão de serviço no aço
f_{yd}	resistência de cálculo do aço à tração
$f_{c,wall}$	resistência do concreto do painel
$f_{c,joint}$	resistência do concreto da ligação
g	carga estática permanente
g_e	carga estática equivalente
h	altura total da peça = espessura total (t)
h_e, h_i	condutância térmica superficial
h_1	distância do C.G. da armadura à linha neutra (cm)
h_2	distância da fibra mais tracionada à linha neutra (cm)
i	raio de giração
k	condutividade térmica
l	altura do painel
l_e	comprimento de flambagem
l_r	vão do painel
n	número de barras
q	carregamento acidental
t	espessura total do painel
t_e	espessura da placa externa, igual à interna
t_i	espessura do isolante
t_1, t_2	espessura da placa 1,2
w	abertura limite de fissura (mm), segundo o ACI 318-89
w	carga permanente majorada pelos coeficientes de ação dinâmica

Δ_1	flecha de primeira ordem
Δ_2	flecha de segunda ordem
ΔT	variação de temperatura
α_c	relação E_s / E_c .
β	$\frac{l}{b}$; coeficiente para cálculo do comprimento de flambagem
β_d	coeficiente de amplificação dinâmica
β_d	coeficiente para computar a fluência; coeficiente na flexão composta
$\beta_1 \beta_2 \beta_3$	coeficientes para cálculo da resistência da ligação de cisalhamento
δ_M	flecha no meio do vão
δ_t	flecha devido à variação de temperatura
ϵ_t	deformação térmica na placa
ϵ_{sid}	deformação específica na armadura i
ϕ	coeficiente para computar variações na geometria do painel
γ_d	coeficiente de segurança para ligação de cisalhamento
γ_d, γ_m	coeficiente de segurança para ligação de compressão
γ'_c	coeficiente de segurança para o módulo de ruptura, igual a 1,5
η_b	coeficiente de conformação superficial das barras (NBR-6118)
η_i	coeficiente para considerar a redução no painel devido à ligação
λ	índice de esbeltez ; coeficiente no controle de fissuras
μ	momento fletor relativo adimensional
ν	força normal relativa adimensional
ρ	taxa geométrica de armadura
ρ_f	taxa geométrica de armadura da seção interessada pela fissuração
σ_{cd}	tensão de cálculo do concreto
σ_{sid}	tensão de cálculo na armadura i
σ_s	tensão na armadura sob solicitação dada no anexo da NBR-7197
σ_t	tensão devido à deformação térmica

Resumo

FONSÊCA, F. J. C. *Projeto de painéis sanduíche de concreto pré-moldado*. São Carlos, 1994. 172 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

No Brasil, os painéis pré-moldados encontram um campo de aplicação muito vasto e ainda pouco explorado na construção de edifícios residenciais, industriais e comerciais. Seguindo uma tendência mundial nesta área, verifica-se o crescente uso de painéis tipo sanduíche: este moderno tipo de construção permite conciliar eficiência estrutural com peso próprio reduzido, além de desempenho termo-acústico superior. Entretanto, as informações sobre painéis sanduíche ainda são muito limitadas, e mesmo a nível internacional existe uma crescente demanda por novas pesquisas. No Brasil, essas informações e pesquisas são quase inexistentes. Apresenta-se neste trabalho um estado-da-arte sobre painéis sanduíche e suas aplicações; critérios gerais de dimensionamento (incluindo diagramas de interação para cálculo na flexão composta). Alguns estudos experimentais foram relatados e seus resultados são discutidos. Apresenta-se ainda um estudo sobre as características técnicas do painel.

Palavras-chave : Concreto; Pré-moldados; Painel Sanduíche

Abstract

FONSECA, F. J. C. *Design of precast concrete sandwich panels.* São Carlos, 1994. 172 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

In Brazil, precast panels have a wide but unexplored applications field in residential, commercial and industrial buildings. The worldwide tendency in this area is to increase the use of sandwich panels. In this modern building system, structural efficiency and reduced weight can be conciliated, also superior thermal and acoustical behavior are reached. However, very limited information is available concerning sandwich panels. Even internationally there is an increasing need for new researches. In Brazil, those information and researches are nearly unknown. Sandwich panels properties and applications are discussed. An state-of-the-art and design criteria (including nondimensional strength interaction diagram for axial load and bending moment about one axis) is presented. Some tests are reported to discuss specific panel behavior. Thermal properties are also discussed.

Keywords : Concrete; Precast; Sandwich panel

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Painel sanduíche é um painel obtido através da associação de duas ou mais camadas ou placas de materiais diferentes. O painel específico que será estudado neste trabalho é um tipo especial de painel em que se utiliza um núcleo de isolante termo-acústico entre duas placas de concreto. As placas seriam ligadas entre si por meio de conectores especiais ou nervuras. Como resultado dessa associação, resulta um elemento de vedação que reúne características que a princípio não poderiam ser reunidas em um painel tradicional de concreto armado :

- resistência estrutural elevada
- bom isolamento termo-acústico
- peso próprio reduzido

O efeito sanduíche foi inicialmente utilizado em habitações como maneira de suprir a deficiência do concreto no isolamento térmico das paredes. Principalmente em países com inverno rigoroso, a preocupação era muito grande em minimizar a troca de calor com o meio externo e com isso, reduzir o consumo da energia utilizada para manter o ambiente aquecido.

Nos primeiros projetos com painéis sanduíche, verificava-se que a preocupação única com a parte térmica desprezava o potencial estrutural que este tipo de construção apresentava. O mais freqüente na época era dispor uma camada de material isolante (geralmente algum tipo de concreto com agregado leve) no lado externo da parede já existente, e em seguida uma camada mais fina de concreto ou argamassa com finalidade única de proteção.

Com o desenvolvimento da tecnologia e utilização da pré-fabricação em larga escala, a necessidade de produção de painéis de peso reduzido levou os pesquisadores a desenvolverem painéis com placas de espessuras menores e utilizar núcleos mais leves. Verificou-se também o uso de ligação rígida entre as placas para enrijecimento da seção. Desta forma, o desempenho estrutural do painel poderia ser aproveitado ao máximo.

A busca da simplificação nos processos de moldagem e montagem tem levado alguns construtores a limitarem o peso próprio de peças pré-moldadas a valores tais que elas poderiam ser transportadas e manuseadas pelo próprio trabalhador, sem a necessidade do uso de equipamentos mecânicos.

Entretanto, tem-se observado que a limitação do peso próprio em função da capacidade do operário leva à perda de produtividade. Muitas vezes, a capacidade do operário manter o mesmo ritmo de trabalho durante todo o dia é superestimada. Na prática, o transporte manual de algumas peças pré-moldadas só seria suportável no caso de poucas repetições.

Esta filosofia de trabalho é encontrada principalmente em obras de infra-estrutura urbana e habitações populares. Na construção de habitações com painéis modulares (geralmente buscando ser o mais abrangente possível) verifica-se também um elevado número de ligações entre painéis.

Nesse sentido, parece interessante o desenvolvimento de painéis de grandes dimensões, que sejam leves pela redução das espessuras das placas de concreto. Assim, poderíamos pensar em “painéis leves” segundo um conceito ampliado de leveza, relacionado com a transportabilidade e manuseabilidade por meio de equipamentos simples, leves, de baixo custo operacional (HANAI, 1992).

O uso de painéis de grandes dimensões reduziria a quantidade de ligações a quase que somente os encontros entre paredes. Resultaria também numa maior industrialização da construção civil com a concentração de grande parte dos serviços nas fábricas, onde as condições de trabalho são melhores que as do canteiro.

Do ponto de vista econômico, SCHNEIDER-CRIEZIS (1983) alerta para a necessidade de quantificar o custo da energia utilizada para controlar a temperatura interna de edificações em geral. Este custo, contabilizado num intervalo maior de tempo, tem-se mostrado elevado quando comparado ao custo total da própria edificação.

É evidente que as condições climáticas do Brasil não exigem tanto rigor e necessidade de manter a temperatura interna por meio de equipamentos elétricos, mas seria interessante analisar alguns casos especiais. Num estudo apresentado por ROBLES-AUSTRIACO et al (1987), foi feita uma comparação entre um sistema tradicional de construção (alvenaria) e um sistema com painéis sanduíche. Segundo seus autores, a edificação com painéis sanduíche proporcionaria um diferencial de temperatura (temperatura do ambiente externo menos temperatura do ambiente interno) até 130 % maior que as habitações tradicionais.

1.2 OBJETIVO

Neste trabalho, pretende-se apresentar o estado-da-arte de painéis sanduíche de concreto com o objetivo principal de contribuir para o desenvolvimento futuro de edificações em geral (edifícios habitacionais, comerciais e industriais) que envolvam o conceito de eficiência térmica aliada à eficiência estrutural.

Nesse sentido, serão discutidas as características dos painéis sanduíche em geral com algum destaque para os painéis pré-moldados de grandes dimensões. Assim, no desenvolvimento do trabalho, serão abordados os seguintes tópicos :

1. Conceituação e caracterização do painel sanduíche e seus componentes;
2. Descrição de alguns processos construtivos com painel sanduíche;
3. Apresentação dos critérios de cálculo;
4. Análise crítica de resultados experimentais disponíveis na bibliografia pesquisada;
5. Análise dos ensaios realizados no Laboratório de Estruturas;
6. Estudo das ligações entre painéis;
7. Estudo das características térmicas.

1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 é apresentada a caracterização do painel e seus componentes segundo o estágio atual da tecnologia desenvolvida nos países que já empregam este tipo de construção há bastante tempo. O desenvolvimento deste capítulo reúne alguns aspectos particulares –coletados na bibliografia pesquisada– que servirão de embasamento para o entendimento dos capítulos subseqüentes. O objetivo é proporcionar uma visão geral dos painéis sanduíche. São também apresentados alguns projetos, experimentais ou não, que utilizam o painel sanduíche de forma geral.

No Capítulo 3 são apresentados os critérios gerais de dimensionamento no Estado Limite de Utilização e no Estado Limite Último. Partiu-se inicialmente dos princípios básicos para o cálculo de painéis tradicionais e a partir daí, foram apresentadas as modificações necessárias para que o cálculo fosse feito com painéis sanduíche. Apresentam-se também diagramas de interação (v , μ) para o cálculo do painel sanduíche submetido à flexão composta

No Capítulo 4 são tratados alguns resultados experimentais. São descritos os ensaios realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) com os painéis da empresa CABRINI MONOLITE Ind. e Com. Ltda. Embora esses ensaios tenham sido restritos à análise do comportamento à flexão do painel, em duas outras séries de ensaios (BUSH & STINE, 1994 e PFEIFFER & HANSON, 1965) foi avaliado o comportamento dos painéis sanduíche de forma mais abrangente e os resultados são usados para complementar a avaliação experimental dos painéis.

O Capítulo 5 envolve os critérios para proceder as ligações de painel para painel. São discutidos apenas os detalhes sobre a resistência das ligações entre painéis e alguns detalhes construtivos. Aqui, observa-se um direcionamento para a construção com painéis de grandes dimensões. O objetivo é fornecer parâmetros iniciais para o projetista de painéis sanduíche que venha a trabalhar com painéis pré-moldados de grandes dimensões.

Finalmente, o Capítulo 6 trata de aspectos unicamente relacionados com o isolamento térmico do painel. O desempenho térmico superior proporcionado por painéis sanduíche motivou o desenvolvimento deste capítulo. A avaliação dessas características permite que o isolamento térmico do painel seja quantificado para uma eventual comparação com outros sistemas. Poderá ser feita a verificação da possibilidade de condensação nos painéis, este problema tem causado sérios danos aos painéis sanduíche.

2 TIPOLOGIA

2.1 INTRODUÇÃO

O princípio básico que caracteriza um painel tipo sanduíche de concreto é a justaposição de duas placas de concreto com um núcleo de material com elevado isolamento térmico. A forma ou o modo em que as duas placas são interligadas definem dois tipos distintos de painéis.

Num primeiro tipo, a ligação entre as duas placas é feita por intermédio da adesão direta das placas com o núcleo de isolante. Uma outra forma de se providenciar a ligação seria por meio de conectores que atravessam o isolante e promovem a ligação entre as duas placas.

A segunda forma de ligação entre as placas (uso de conectores) apresenta-se mais eficiente do ponto de vista estrutural, de forma que será dada atenção especial aos diversos tipos de conectores utilizados em painéis sanduíche.

Inicialmente cabe destacar que o painel sanduíche, como qualquer outro tipo de painel, pode ser do tipo portante ou apenas de vedação. O painel sanduíche possui características que o tornam peça estrutural por natureza. O raio de giração relativamente elevado devido à maior inércia proporcionada pelo afastamento das placas é uma excelente característica do painel. A título de ilustração, um painel sanduíche com 15 cm de espessura total, possui raio de giração 20% maior que uma parede de alvenaria com mesma espessura e 125% maior que um painel de concreto

com 8 cm de espessura. Mesmo assim, o painel de vedação encontra um campo de aplicação bastante extenso.

Podemos definir o painel portante, ou painel estrutural, como aquele responsável pela resistência aos esforços predominantes da estrutura. Numa edificação constituída de painéis estruturais, cada painel, de forma interdependente, resiste aos esforços oriundos de ações externas e transferem a outros painéis da estrutura carregamentos verticais e horizontais.

O painel de vedação, ou painel não-estrutural, é projetado com função de resistir a esforços produzidos pelo próprio painel e por ações horizontais. Deste modo, apenas esforços causados pelo peso próprio do painel e por ação do vento (além dos esforços de origem interna) afetarão o comportamento do painel. A resistência a cargas verticais é responsabilidade de uma estrutura portante independente.

É importante chamar a atenção para o fato de que o painel não-estrutural ainda é capaz de transferir uma pequena parcela dos esforços, mesmo de grandeza desprezível, a outros painéis da estrutura. A transferência ocorre devido à diferença de deformações entre o painel e a estrutura.

2.2 HISTÓRICO

O princípio sanduiche foi usado pela primeira vez na construção civil em 1849 por Willian Fairbairn em ensaios com pontes constituídas de vigas compostas utilizando madeira laminada e concreto (COLLINS, 1954).

O primeiro exemplo que se tem conhecimento do uso de painéis tipo sanduíche na construção de edificações deve-se ao pioneirismo dos americanos que já em 1906 experimentavam um engenhoso processo de construção de painéis tipo “tilt-up” (COLLINS, 1954), no qual os painéis ou paredes inteiras são moldadas em posição horizontal e o mais próximo possível do local definitivo, onde são erguidos para a posição vertical após a cura.

O sistema consistia em moldar um grande painel onde a plataforma que servia de fôrma seria erguida junto com o painel. O efeito sanduíche era conseguido através da moldagem da placa inferior de 50 mm com uma camada de areia (também de 50 mm) sobre a mesma, e uma segunda placa de 50 mm sobre a camada de areia. A areia, na verdade, servia apenas para auxiliar na concretagem da segunda placa e, durante o erguimento do painel era “lavada” com uma mangueira de incêndio.

A seção transversal do painel na sua posição final consistia de duas placas de concreto com o colchão de ar deixado pela areia lavada. O projeto exato é desconhecido, sabe-se apenas que as placas eram ligadas por conectores (Figura 1).

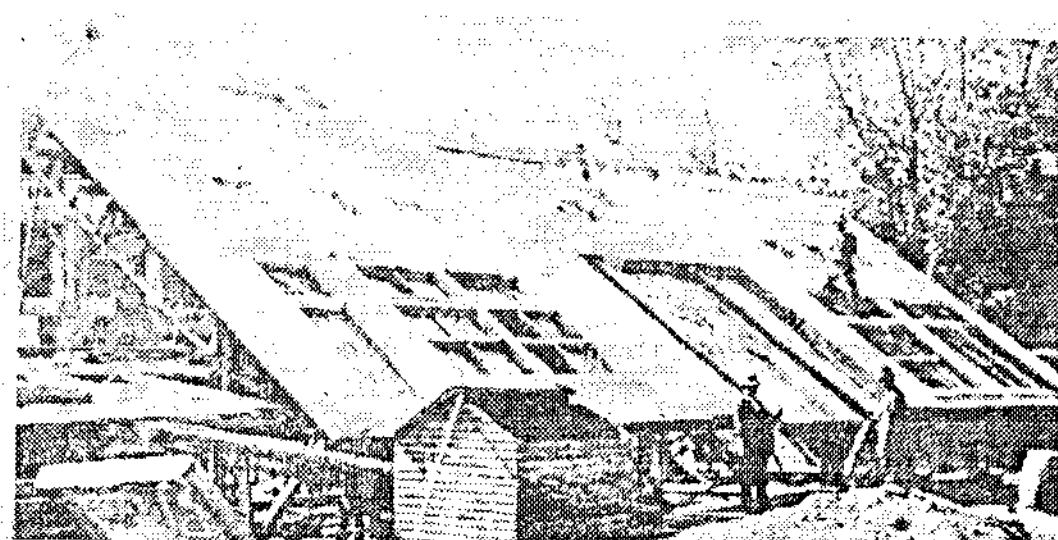


FIGURA 1 -- Sistema pioneiro de painel sanduíche (COLLINS, 1954)

Um sistema sanduíche, desenvolvido pelos construtores suecos em 1933, constituía em moldar sobre a face externa do painel de concreto usual uma camada de concreto leve com 127 mm de espessura, e como proteção, 16 mm de argamassa aplicada em forma de rebôco (COLLINS, 1954). Como nos demais sistemas sanduíche, o objetivo principal dos construtores era proporcionar maior isolamento térmico para os painéis de então.

ROBERTS (1951) descreve um sistema desenvolvido na sua época que foi utilizado para construção de uma usina de celulose em Vancouver, Canadá. Nesta obra, foram utilizados painéis tipo sanduíche de 1,83 por 3,05 m com placa externa de 50,8 mm e placa interna de 38 mm com núcleo de isolante constituído de “cellular glass” com 50,8 mm de espessura.

Inúmeros sistemas foram desenvolvidos na década de 50, conforme relata COLLINS (1954), com diversos materiais utilizados como isolante térmico. Entre os principais sistemas, podemos citar os descritos a seguir.

No Canadá, um painel constituído de apenas duas camadas era projetado de forma que uma camada de concreto com vermiculita utilizada como isolante deveria ser aplicada sobre a placa estrutural do painel já pronta e na posição final. Este procedimento, aliás, era praticamente padrão na época.

Nos Estados Unidos, um sistema de painéis de vedação para estrutura metálica de um edifício industrial consistia de painéis com duas placas com espessura de 44 mm cada e núcleo de isolante com 38 mm de concreto moldado com “cavacos” de madeira quimicamente tratada.

E.I. du Pont de Nemours Co. utilizou painéis para construções industriais com núcleo de gesso (cored gypsum) em 1946.

Em 1967, Victor Weisman patenteou nos Estados Unidos um sistema que hoje encontra um grande número de variações e patentes no mundo inteiro (PICKARD, 1990). Este sistema é constituído basicamente de pré-painéis de material isolante (geralmente poliestireno ou poliuretano) armados com uma tela soldada disposta em cada uma das faces e interligadas por meio de barras eletrosoldadas numa configuração tridimensional de barras com elevada rigidez.

Os painéis constituídos da forma descrita no parágrafo anterior são então montados de acordo com o projeto arquitetônico. A resistência do sistema é assegurada pelo revestimento de argamassa efetuado em cada uma das faces do isolante por meios tradicionais de emboçamento ou por processos mais modernos que empregam mecanismos de jateamento da argamassa sob pressão. No final deste capítulo serão descritos alguns desses sistemas.

2.3 COMPONENTES

No conceito de painel sanduíche estão definidos os seus elementos constituintes, da forma que será caracterizada neste capítulo : duas placas de concreto com um núcleo central de material com elevado isolamento termo-acústico formando uma seção sanduíche. Os conectores podem ter inúmeras configurações, como será visto adiante. Assim, os elementos constituintes do painel sanduíche, da forma que serão apresentados neste capítulo, podem ser divididos em três :

- PLACAS DE CONCRETO
- NÚCLEO DE ISOLANTE
- CONECTORES

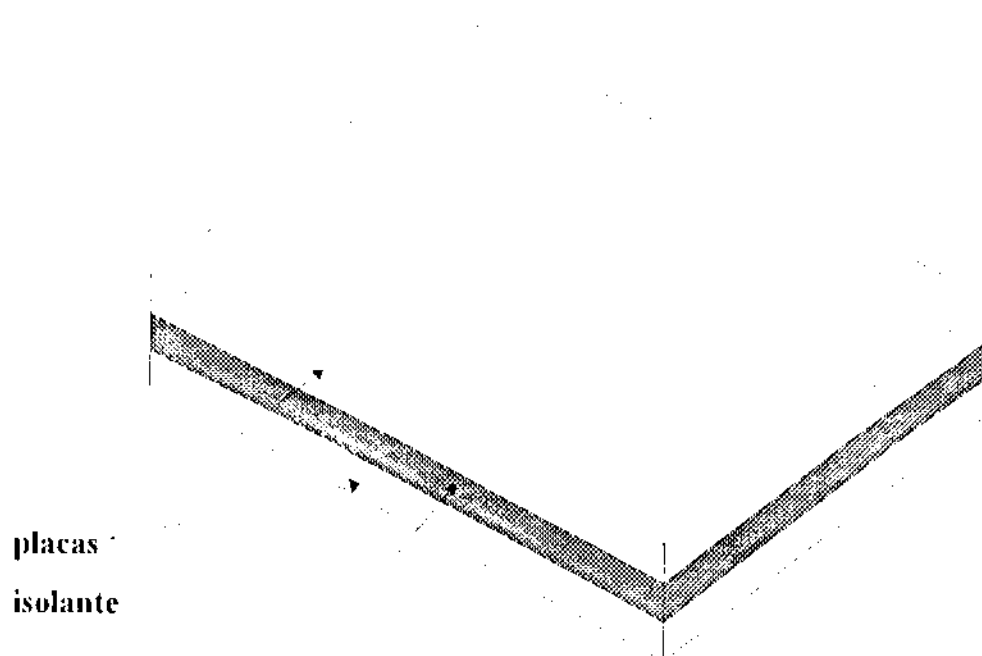


FIGURA 2 – Representação dos elementos constituintes do painel sanduíche.

2.4 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

O comportamento estrutural que a seção transversal do painel pode assumir é a principal indeterminação no dimensionamento do painel em si, quando considerado isoladamente. A mais importante característica da seção transversal do painel está relacionada com a possibilidade ou não de deslocamentos transversais relativos entre as placas. Com o conhecimento preciso das propriedades geométricas da seção, o dimensionamento é equivalente ao de outra seção qualquer de concreto armado. Na estrutura constituída de painéis sanduíche, outras variáveis também são muito importantes no dimensionamento.

Segundo uma abordagem clássica apresentada pelo PCI (PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE) Manual (1977) e por EINEA et al. (1991) sobre o comportamento estrutural, os painéis podem ser classificados em três tipos:

- Painel totalmente composto (interação total entre as placas);
- Painel parcialmente composto (interação parcial entre as placas);
- Painel não-composto (nenhuma interação entre as placas).

No painel totalmente composto, a seção transversal funciona como se fosse uma seção única, de inércia majorada pelo afastamento das placas devido à presença do núcleo de isolante. Não existe deslocamentos relativos entre as duas placas, onde ambas possuem função estrutural e resistem em conjunto aos esforços a que está submetido o painel.

O funcionamento composto do painel é garantido por uma ligação rígida entre as duas placas através de conectores que impedem movimentos relativos entre as duas placas na direção do vão do painel e transferem 100% do cisalhamento entre as placas (Figura 3.a).

Na verdade, a garantia da composição integral entre as placas requer o uso de conectores em excesso, e muitas vezes torna-se bastante dispendioso.

Na maioria dos casos, a quantidade e disposição de conectores está mais relacionada a aspectos construtivos que a necessidade de garantir uma composição integral. O que se tem conhecimento pelos painéis já em uso é que primeiro procura-se dispor de conectores dentro de um limite mínimo recomendado pela experiência anterior para então determinar qual o grau de composição obtido com esta disposição.

Dependendo da rigidez e quantidade dos conectores que fazem a ligação entre as placas, a composição do painel pode ser apenas parcial. Painéis parcialmente compostos também são constituídos de duas placas de função estrutural. A diferença está no fato de que o funcionamento totalmente composto da seção não está garantido. Os conectores possuem capacidade de transferir entre 0 e 100% do cisalhamento entre as duas placas de concreto (Figura 3.b).

Na determinação do grau de composição entre as placas, está o grande problema enfrentado pelos projetistas de painéis sanduíche. A análise da composição exige um estudo minucioso que somente pode ser feito através de ensaios. Como a disposição dos conectores pode ser de infinitas maneiras, torna-se difícil caracterizar a composição do painel sanduíche de maneira geral.

Painel não-composto é aquele em que o funcionamento entre as duas placas de concreto se dá de forma completamente independente, como se fossem dois painéis. Neste tipo de painel, os conectores não são capazes de transferir o cisalhamento entre as placas ou transmitem apenas uma parcela insignificante.

O painel não-composto às vezes nasce de uma “sofisticação” dos painéis já em uso no mercado tradicional, como os painéis PI ou lajes alveolares. Em regiões de inverno rigoroso, as indústrias reforçam o isolamento térmico do painel tradicional com uma camada de material isolante protegido por uma segunda placa de concreto. A segunda placa de concreto pode ser um outro painel estrutural ou simplesmente um revestimento com finalidade arquitetônica. Assim, ainda poderíamos classificar o painel não-composto em dois tipos :

1. Painel em que ambas as placas possuem função estrutural e resistem independentemente aos esforços aplicados. A distribuição ou divisão das cargas laterais se dá de acordo com a rigidez de cada placa (Figura 3.c);

2. Paineis em que apenas uma das placas tem função estrutural (figura 3.d), de forma que ela resiste sozinha a todos os esforços a que está submetido o painel, inclusive suportando o peso da placa não-estrutural, que aqui possui a função única de revestimento e proteção do isolante. Este tipo de painel é bastante utilizado em países de inverno rigoroso, como foi citado anteriormente, utilizando-se os painéis tradicionais com o reforço térmico da camada de isolante (figura 4).

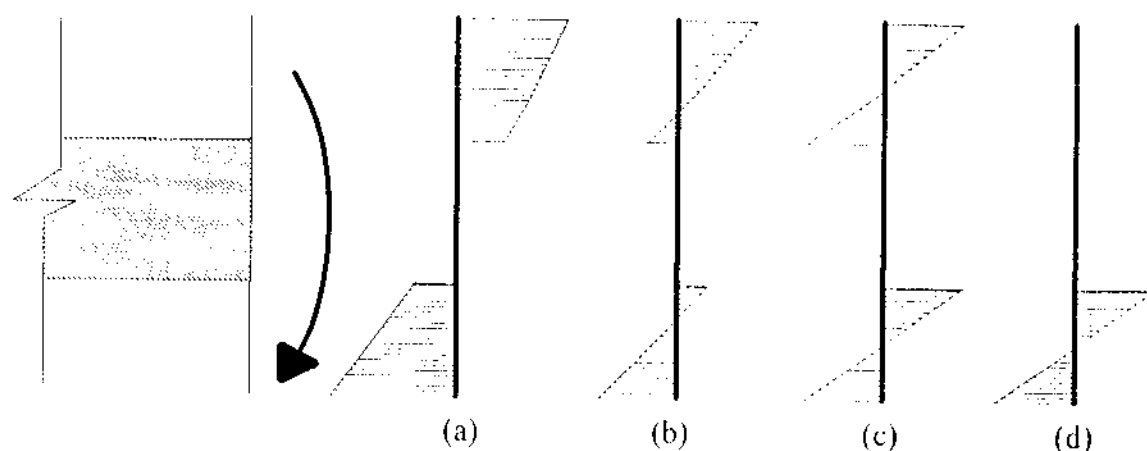


FIGURA 3 – Distribuição de tensões nas placas segundo o comportamento estrutural

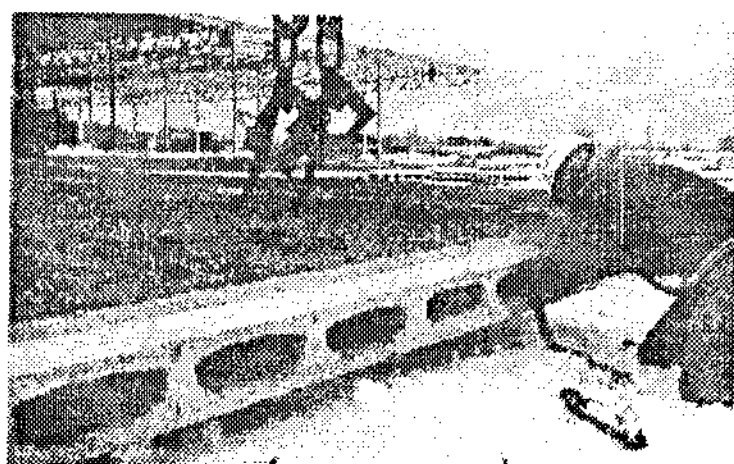


FIGURA 4 – Painéis fabricados pela empresa FABCON[†] Inc.

[†] FABCON, Inc. / Folheto de produtos / Correspondência pessoal

O isolante contribui de maneira significativa para a composição, mas em geral, recomendava-se que a adesão isolante/placas fosse desprezada para que a ligação entre as placas fosse responsabilidade exclusiva dos conectores, quando poderia ser mais precisamente avaliada.

Na edição de 1992 do PCI Design Handbook, é feita uma análise com base na durabilidade da composição inicial entre as placas que a abordagem clássica não fazia maiores considerações a respeito. A observação de que a aderência inicial entre o isolante e a placa é forte o bastante para ser considerada por um certo período de tempo levou os pesquisadores a recomendarem que essa aderência não fosse completamente desprezada. Assim, o painel poderia ser avaliado como

- Painel totalmente composto por toda a vida útil;
- Painel não-composto por toda a vida útil;
- Painel composto somente para esforços durante os estágios iniciais.

Nos casos em que a composição é variável ao longo do tempo, os pesquisadores afirmam que poderia ser considerada, para painel não-composto, uma certa composição inicial resultante da adesão entre as placas e o isolante. Desta forma, para esforços oriundos da desfôrma, transporte e montagem, a seção transversal do painel poderia ser considerada como composta.

Com o passar do tempo, devido a movimentos diferenciais entre as placas (não impedidos por conectores rígidos), a adesão do isolante e a placa se romperia. O painel assumiria comportamento não-composto e passaria a funcionar dessa forma para cargas de serviço durante o restante da vida útil do painel. A placa não-estrutural desses painéis precisaria ser dimensionada para resistir aos esforços oriundos da composição, mesmo que não fosse total.

É preciso considerar que em painéis compostos, onde o comportamento já está garantido pelos conectores rígidos, a aderência entre as placas e o isolante representa uma redundância na transmissão do cisalhamento. Este fato possibilita ao painel comportamento distinto em regiões diferentes do vão e uma possível redistribuição de esforços no Estado Limite Último.

BUSH & STINE (1994) realizaram um extenso estudo para avaliar a aderência levando em consideração a durabilidade dessa contribuição em painéis sanduíche com conectores de treliça metálica. Ao que parece, a consideração da aderência somente para os estágios iniciais estaria desprezando, em muitos casos, uma efetiva composição das placas do painel.

Em seus ensaios, BUSH & STINE (1994) comprovaram que a aderência entre as placas de concreto e o isolante de poliestireno expandido é forte o bastante para enrijecer o painel quando se considera a ação de cargas laterais. Os ensaios cíclicos simulavam uma variação diária de temperatura a partir de 10 °C. À medida que se observava a manutenção da rigidez, após alguns milhares de ciclos, a variação simulada de temperatura era aumentada. Ao final de 55.000 ciclos, observou-se uma redução de apenas 15 % na rigidez. O monitoramento dos conectores apontaram um acréscimo no esforço resistido por esses elementos. Este fato leva a crer que a redução na rigidez deveu-se à deterioração da aderência e conseqüente redistribuição dos esforços para o conector. Mais detalhes sobre esse ensaio são apresentados no Capítulo 4.

O mais interessante, para efeito de projeto, seria fazer um estudo sobre comportamento estrutural envolvendo composição entre placas e avaliação da durabilidade dessa composição para o tipo de painel que se pretende utilizar. Para alguns painéis produzidos em usinas, a prática tem comprovado que existe um grau de ação composta por toda a vida útil do painel (PCI Design Handbook, 1992).

2.5 PLACAS

As placas do painel sanduíche, segundo o comportamento estrutural descrito anteriormente, podem ser classificadas em placa estrutural e placa não-estrutural.

2.5.1 PLACA NÃO-ESTRUTURAL

A placa não-estrutural é aquela cuja contribuição para a capacidade resistente do painel é desprezível. Limita-se somente à função de proteção do isolante e de acabamento externo do painel. Este tipo de placa existe em painéis não-compostos onde é preciso dispor de uma proteção para o isolante.

De modo geral, a placa não-estrutural fica voltada para o lado externo da edificação, onde recebe acabamentos arquitetônicos diversos. Uma outra razão para dispor a placa não-estrutural no lado externo, é que a placa estrutural (voltada para o lado interno) possui maior inércia térmica e retém maior quantidade de energia no interior da edificação.

2.5.2 PLACA ESTRUTURAL

A placa estrutural é aquela responsável por uma parcela ou totalidade da resistência do painel. Em painéis compostos e parcialmente compostos, as duas placas são estruturais e funcionam de acordo com a composição proporcionada pelos conectores, enquanto que em painéis não-compostos, podemos ter uma ou duas placas estruturais.

2.5.3 ESPESSURAS

A espessura da placa estrutural depende fundamentalmente do cálculo estrutural. Ainda é preciso analisar fatores como: tipo de agregado, processo de produção, condições ambientais, e outros fatores arquitetônicos. A partir da espessura inicial, determinada pelo cálculo estrutural, uma análise mais detalhada envolvendo os demais fatores leva à determinação da espessura mais adequada.

Segundo recomendações do PCI Manual (1977), uma espessura mínima de 76 mm deve ser adotada para placas estruturais de painéis não protendidos e 50 mm para painéis com protensão. Esses valores, que segundo a prática são

bastante conservadores, dependem também da quantidade de armadura utilizada. Espessuras menores, com maior quantidade de armadura, podem ser utilizadas, embora com maior risco de fissuração.

A placa não-estrutural, ainda segundo o PCI Manual (1977), deve ter no mínimo 50 mm de espessura, mas nunca menor que três vezes o diâmetro máximo do agregado. Os fatores determinantes para a espessura da placa não-estrutural, em geral, são o cobrimento mínimo recomendado para a armadura e o comprimento de ancoragem dos conectores.

É interessante salientar que todos esses limites para espessuras de placas são muito rigorosos e que na prática, são encontrados valores inferiores a esses recomendados. Na América do Norte, geralmente as placas têm de 37 a 63 mm de espessura. Na Europa é utilizada uma espessura elevada (100 mm) para a placa estrutural interna e 50 mm para a placa externa (PFEIFER & HANSON, 1965). Segundo o PCI Design Handbook (1992), placas com 50 mm de espessura têm sido empregadas com sucesso. O uso da argamassa armada, como material para as placas, tem possibilitado reduzir a espessura das placas.

Num interessante processo apresentado por NICHOLLS (1991) para a produção de painéis sanduíche onde se tira proveito da resistência ao cisalhamento do núcleo, placas com espessuras da ordem de 2 mm foram utilizadas.

O processo consiste em envolver um painel de poliestireno expandido (isopor) em uma malha ou tela de polipropileno. As faces do painel são obtidas por imersão do núcleo num recipiente contendo uma argamassa especial com látex para melhorar a aderência com o núcleo. A determinação analítica da espessura, neste caso, visava a limitação de deformações com custo mínimo.

Em alguns sistemas em que as faces são moldadas no local com a aplicação de argamassa sobre o painel de poliestireno (por jateamento ou mesmo processos usuais), a espessura de cada placa fica entre 19 e 40 mm.

Um sistema construtivo proposto por SUN et al. (1985) onde se utilizam módulos de no máximo 140 cm, a espessura da placa ficou em 25 mm. Um outro sistema proposto por CHANG & NANNI (1985) utilizou painéis de grandes dimensões com placa de 9,5 mm e núcleo de poliestireno expandido.

Alguns dos sistemas já desenvolvidos com painéis sanduiche são apresentados com mais detalhes no final deste capítulo.

Para efeito de projeto, a espessura está diretamente relacionada com a resistência do painel. Uma análise apresentada por PFEIFER & HANSON (1965), relaciona momento de fissuração com flecha onde se faz variar a espessura do painel. Esses painéis usaram treliça metálica como conector e poliestireno ou poliuretano como isolante (Figura 5) :

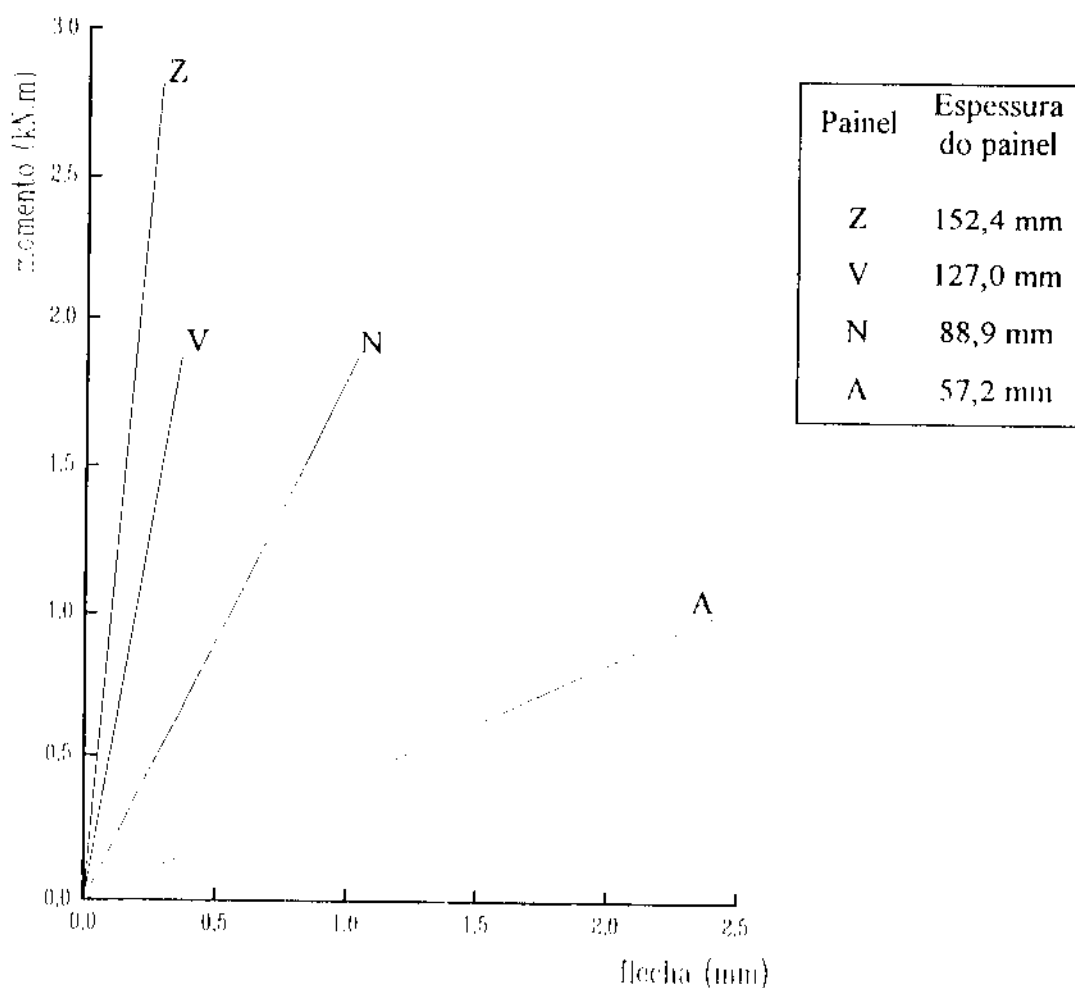


FIGURA 5 - Diagrama momento x flecha segundo a espessura do painel.

2.5.4 ARMADURAS

A armadura para as placas de painéis sanduíche são do mesmo tipo das que poderiam ser usadas nos painéis tradicionais de concreto ou argamassa : telas soldadas, barras de aço de pequeno diâmetro , armadura ativa (protensão) e até alguns casos em que poderia não se dispor de armadura alguma (placa não-estrutural em painéis não-compostos). Com a utilização de fibras de polipropileno, ainda é possível reduzir a quantidade de armadura do painel .

Algumas recomendações de ordem prática, adotadas nos Estados Unidos (PCI Manual, 1977), limitam o espaçamento de barras de aço em painéis expostos ao tempo a um máximo de 5 vezes a espessura da placa. Para telas soldadas, o espaçamento é limitado a um máximo de 15 cm.

Exceto em casos especiais em que a prática recomende o contrário, a taxa mínima de armadura em cada direção deve ser de 0,1% da seção transversal da placa (PCI Manual, 1977). Segundo a NBR 6118 (1982), para seções retangulares de concreto, a taxa mínima seria de 0,15 % da seção transversal.

Ainda segundo o PCI Manual (1977), poderia-se dispor de armadura inferior a 0,1% da seção transversal nos seguintes casos :

- Placas não protendidas, não exposta ao tempo com dimensão menor que 122 cm.
- Placas não protendidas, expostas ao tempo com dimensão menor que 61 cm.

Segundo os resultados do trabalho apresentado por BASUNBUL e AL-SULAIMANI (1991), poderiam ser feitos alguns comentários sobre o tipo de armadura do painel sanduíche :

- O número de camadas de telas não apresenta influência significativa na rigidez do painel no Estádio I, mas apresenta bons resultados no Estádio II;
- O uso de armadura de esqueleto parece melhorar as características elásticas do painel bem como seu comportamento após as primeiras fissuras;
- Aumentando-se o número de camada de telas e usando-se armadura de esqueleto na placa tracionada, é possível aumentar a ductilidade e a resistência última do painel.

2.6 ISOLANTES

O uso de painéis tradicionais na construção civil apresenta a desvantagem de, devido à sua pequena espessura, proporcionar baixo isolamento termo-acústico ao ambiente interno.

A escolha do material isolante constitui peça fundamental na eficiência térmica do painel. O isolante ideal deve ser de baixa densidade, bom isolamento termo-acústico e preço acessível. Como um material que reúna todas essas características não é comum, deve-se fazer a escolha do material isolante de acordo com um estudo bem elaborado sobre o que é mais importante em cada projeto: se o peso próprio do painel, se o isolamento termo-acústico ou se o custo da obra.

Às vezes, pode ser mais importante obter-se o máximo de isolamento térmico, independente do peso próprio ou do custo final. No caso de câmaras frigoríficas, um bom isolamento proporciona maior economia de energia e o investimento inicial pode ser recuperado na economia mensal da conta de energia.

Para residências em climas não tão rigorosos, não é interessante um isolamento térmico muito eficiente, e sim um custo mais acessível, onde se tira maior proveito das características estruturais do painel.

Do ponto de vista estrutural, o tipo de isolante apresenta maior importância quando se trabalha com painéis sem conectores devido ao efeito da aderência. À medida que se utilizam conectores mais eficientes, a importância do isolante limita-se apenas à sua eficiência térmica (Figura 6).

Entre os vários tipos de isolantes utilizados em painéis sanduíche, podemos citar :

- Poliestireno expandido (comercialmente conhecido como isopor)

- Poliuretano

- Fibra de vidro (fiberglass)

- Vidro celular (cellular glass)

Tipo do núcleo de isolante:	
E, F, G : poliuretano	
S, T, V : poliestireno	HH : concreto celular
EE, DD : “foamed glass”	AA, BB : fibra de vidro

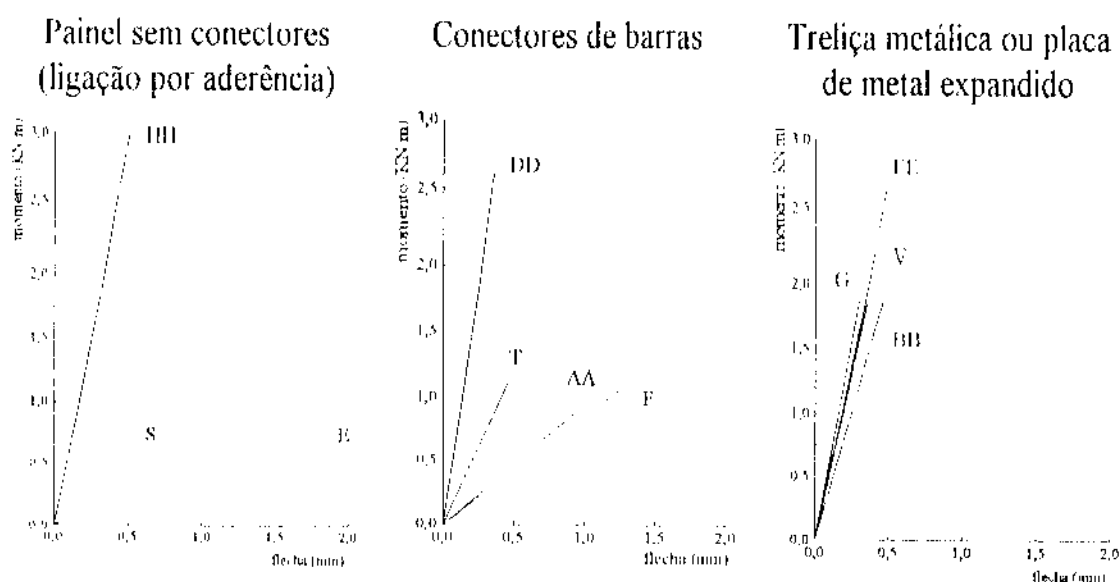


FIGURA 6 – Diagrama momento de fissuração x flecha segundo o tipo de isolante.

2.6.1 CARACTERÍSTICAS

O isolante (geralmente disposto diretamente sobre o concreto fresco) deve possuir baixa absorção para minimizar a perda de água do concreto. A permeabilidade elevada também causa danos à resistência térmica do painel à medida que a infiltração de umidade nas células do isolante reduz a resistência térmica (maior condutividade térmica da água).

Na obrigatoriedade de se utilizar isolantes com absorção elevada, poderia-se dispor um filme impermeável ou camada seladora entre o concreto e o isolante. EINEA et al. (1991) recomendam o uso de isolante de poliestireno feito por extrusão devido à sua baixa absorção d'água (Tabela 1)

A resistência ao fogo do núcleo de isolante como elemento único não tem sentido de ser analisada pois alguns dos isolantes podem ser até inflamáveis. O enclausuramento do núcleo entre as placas de concreto ainda impossibilita-o de ser consumido pelo fogo devido à falta de oxigênio. O que precisa ser feito é a análise do painel como um todo, onde as placas de concreto oferecem proteção ao isolante.

A norma americana ASTM E119 (1976) classifica a resistência ao fogo segundo a durabilidade do material quando exposto ao fogo até alcançar o colapso (end point). Em painéis sanduíche, a durabilidade é definida pela associação da durabilidade individual de cada elemento.

Nos ensaios apresentados pelo PCI Manual (1977), os painéis apresentaram resistência ao fogo que variou de 1h 23m a 4h 25m. A espessura da placa de concreto variou de 38 a 76 mm e o isolante tinha espessura de 19 a 50 mm. Nos ensaios realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) em painéis da CABRINI MONOLITE², os resultados atenderam aos critérios de avaliação da norma MB-1192 (1977). Com base nesses resultados disponíveis, podemos concluir que o revestimento, de maneira geral, oferece boa proteção ao núcleo de isolante.

A variação de temperatura também produz alterações nas características do isolante. A redução na temperatura provoca um acréscimo no módulo de elasticidade, na resistência do isolante e na resistência térmica.

A porosidade do isolante reflete diretamente a aderência do isolante com a placa. Um isolante de alta porosidade produz uma maior aderência com as placas de concreto. Em geral, recomenda-se que, mesmo em isolantes de alta porosidade a adesão não seja considerada por toda a vida útil do painel (PCI Design Handbook, 1992; EINEA et al. 1991; PCI Manual, 1977). Entretanto, ensaios cíclicos realizados por BUSH & STINE (1994) atestam que a composição pela aderência não se destrói com tanta facilidade. Acreditamos que em painéis compostos, poderíamos utilizar propositalmente um isolante de alta porosidade para aumentar a contribuição do isolante na composição das placas.

² CABRINI MONOLITE Ind. e Com. Ltda. / Material promocional - 1993

A respeito da espessura do isolante, uma placa duas vezes mais espessa que outra não possui o dobro da resistência térmica. Embora a expressão da resistência térmica seja uma função linear (como será visto no Capítulo 6), pode ocorrer uma perda de até 5% sobre o valor teórico esperado para a resistência térmica do isolante (EINEA et al., 1991).

Uma outra característica considerada para isolantes é o efeito da idade. Segundo STRZEPEK³ *apud* EINEA et al. (1991), a resistência térmica dos isolantes diminui com o tempo devido a fatores ambientais como deterioração física e absorção de água. Na maioria dos isolantes, a redução da resistência térmica como consequência do “envelhecimento”, ocorre logo após a produção.

Devido à não disponibilidade de dados que comprovem um prejuízo maior para o isolante, quando tratamos de intervalos de tempo da ordem da vida útil do painel, as características do isolante serão consideradas inalteráveis durante a sua vida útil.

³STRZEPEK, W.R. Overview of physical properties of cellular thermal insulations. *Insulation materials, testing, and application*. ASTM, Philadelphia, p.121-40, 1990.

TABELA 1 – Características dos isolantes para painéis sanduíche.

Material ⇒	Poliestireno	Poliestireno	Poliuretano		vidro
Propriedades	Expandido	Expandido	Isocianureto	“Phenolic”	celular
⇓		(extrusão)			
Densidade (kg / m ³)	16 - 32	22,5 - 64	32 - 96	32 - 48	136- 192
Absorção d'água (%)	< 2,5	< 0,3	2 - 5	< 10	0
Temperatura máxima de uso	74 °C	74 °C	121 °C	149 °C	482 °C
Expansão térmica (x 10 ⁻⁶ / °C)	4,5 - 7,2	4,5 - 7,2	5,4 - 10,8	1,8 - 3,6	0,3 - 0,8
Resist. compressão (MPa x 10 ⁻³)	69 - 228	103 - 862	172 - 690	69 - 241	690-1448
Resist. tração (MPa x 10 ⁻³)	124 - 172	172 - 862	310 - 965	414	345
Resist. flexão (MPa x 10 ⁻³)	172 - 517	276 - 965	345 - 1448	172	552 - 690
Resist. cisalhamento (MPa x 10 ⁻³)	138 - 241	241 - 482	138 - 690	83	345

OBS.: Os valores da Tabela 1 são para materiais disponíveis no mercado norte-americano e podem não ser representativos para todos os produtos, inclusive os equivalentes no mercado brasileiro que ainda podem apresentar diferença de valores mesmo para produtos similares de fabricantes distintos.

2.6.2 ESPESSURAS

A espessura do núcleo de isolante deve ser determinada de acordo com as características térmicas do material e da resistência térmica pretendida para o painel. Uma análise não direcionada para características térmicas e mais voltada para características estruturais indica a espessura do isolante de acordo com a espessura total pretendida para o painel. Segundo recomendações do PCI Manual (1977), uma espessura mínima de 25 mm deve ser utilizada para qualquer tipo de painel.

A espessura máxima para o núcleo de isolante depende fundamentalmente das características de flexão dos conectores. É preciso avaliar até que valor de espessura para o isolante não comprometeria a rigidez dos conectores : o comprimento do conector sujeito à flexão é a própria espessura do isolante. Embora um não necessariamente limite o outro, os dois devem ser projetados para serem compatíveis. KONCZ (1974) recomenda que o isolante não tenha mais que 60 mm, este limite deve-se somente aos cuidados com a rigidez do conector.

Seguindo o critério térmico, a determinação da espessura do isolante não deve ser baseada em fatores relacionados exclusivamente com o painel. Antes de se concluir que uma espessura maior de isolante é necessária, deve-se considerar fatores como : insolação, efeito da inércia térmica, área envidraçada e ventilação controlada entre outros. SCHNEIDER-CRIEZIS (1983) apresenta alguns recursos que podem ser utilizados para climatização natural da edificação.

2.6.3 PONTE TÉRMICA

“ Ponte térmica é um fenômeno associado ao modo como o calor move-se através de substâncias com diferentes condutividades térmicas” (McCALL, 1985). A difusão do calor entre as placas do painel se dá por meio de pontes térmicas ou “caminhos” ligando diretamente a fonte de calor ao ambiente mais frio. A diferença de energia entre os dois pontos é a força que conduz o calor.

Quando, durante o processo de moldagem das placas, uma quantidade excessiva de argamassa penetra no isolante, ligando uma placa à outra, ou quando se utilizam conectores metálicos em excesso, formam-se várias pontes térmicas por onde uma quantidade demasiada de calor escapa. Os conectores de aço têm até 1800 vezes a condutividade do isolante. Isto reduz significativamente o valor da resistência térmica do painel (Capítulo 6).

A formação de pontes térmicas é preocupação constante dos projetistas de painéis sanduíche em países de clima frio. Embora contribua para a composição entre as placas, como também foi mostrado pelos resultados dos ensaios de BUSH & STINE (1994), as pontes térmicas são responsáveis por aumentos significativos no Coeficiente Global de Transmissão de Calor (valor U) do painel e conseqüentemente maior quantidade de energia para aquecer os ambientes. Em alguns casos, o valor U do painel pode aumentar até 382 % devido ao uso excessivo de conectores e “pontes” de argamassa (Capítulo 6).

O problema das pontes térmicas, embora seja de fundamental importância em alguns países que utilizam painéis sanduíche, não seria exatamente o grande problema dos painéis sanduíche utilizados no Brasil. O nosso clima, de maneira geral, não exige rigoroso controle de temperatura para ambientes internos. O fator realmente determinante para a viabilização do uso de painéis sanduíche no Brasil seria um preço competitivo com os sistemas tradicionais de construção. A preocupação com a formação de pontes térmicas não pode onerar excessivamente o custo das habitações.

2.6.4 DISPOSIÇÃO

A principal recomendação quanto à disposição do núcleo de isolante entre as duas placas está relacionada com a preocupação em minimizar a formação de pontes térmicas. As aberturas no isolante para passagem dos conectores devem ser preenchidas com material isolante ou seladas para que o concreto fresco não infiltre nessas aberturas e forme pontes de fluxo de energia.

A descontinuidade do isolante deve ser minimizada através do uso de painéis de material isolante com o maior tamanho possível e evitando-se as emendas de topo (Figura 7.a). Existem diversas maneiras eficientes de providenciar a emenda entre dois painéis de isolante (Figuras 7.c, d, e). Pode-se ainda dispor o isolante em duas camadas, com emendas defasadas entre as camadas (Figura 7.b). Poderíamos pensar em usar fita adesiva para selar a emenda de topo que assim não apresentaria problemas de infiltração de concreto.

O isolante pode apresentar expansão quando submetido a temperaturas de cura superiores a 65 °C. No caso em que o isolante tem seu espaço limitado entre nervuras de concreto, deve-se assegurar um espaço mínimo para a expansão térmica do isolante entre as nervuras.

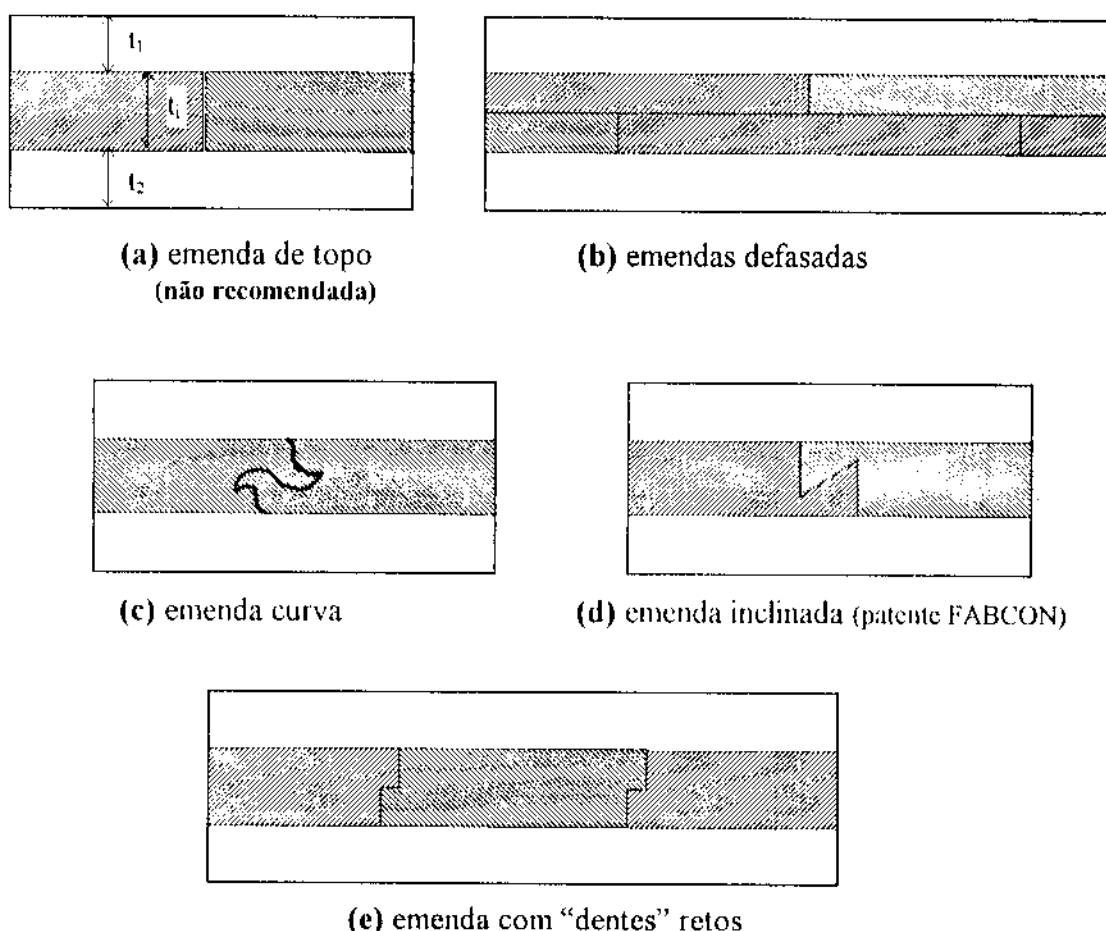


FIGURA 7 – Disposição longitudinal recomendada para as emendas de isolantes.

2.6.5 ANTIADERENTES

O isolante, dependendo do tamanho e da porosidade, pode transferir por adesão com a placa uma parcela de até 0,069 MPa de cisalhamento (EINEA et al. , 1991). Alguns tipos de painéis (MACHADO JÚNIOR, 1991), utilizam como única forma de ligação entre as placas a adesão entre placas e isolante. Neste tipo de painel, o processo de fabricação garante a aderência do isolante com as placas de argamassa, que servem de fôrma para a injeção e confecção do isolante (veja mais detalhes no Item 2.8).

No processo tradicional, onde as placas muitas vezes são moldadas com o isolante servindo como “ fôrma perdida” , é preciso evitar a adesão entre o isolante e as placas no caso de painéis não-compostos.

Para evitar a adesão inicial do isolante com as placas, pode-se utilizar filmes de polipropileno, desformantes e qualquer outra película não absorvente que evite o contato do concreto fresco com o isolante. Neste ponto, a película protetora também ajuda no combate à formação de pontes térmicas. Uma outra forma de evitar a transferência do cisalhamento entre as placas seria dispor o isolante em duas camadas sobrepostas (Figura 7.b). Assim, mesmo que uma folha de isolante tenha alguma aderência com a placa adjacente, as duas placas de concreto ainda são capazes de movimentos independentes.

2.7 CONECTORES

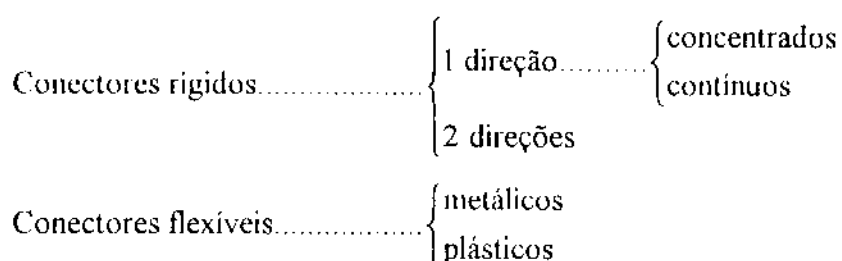
Conectores são elementos de concreto, aço ou plástico usados para interligar as duas placas paralelas de forma a manter o isolante firme no local e impedir a separação das placas. Quando de aço galvanizado, deve-se observar para que o contato do conector com a armadura principal da placa não produza reações galvânicas.

No caso de painéis sem conectores, o fator mais importante no projeto é a aderência entre as placas e o isolante. Em painéis com conectores, o tipo de conector passa a ser a variável mais importante para se melhorar o desempenho estrutural do painel, principalmente quando se utilizam isolantes mais leves.

A série de ensaios realizados por PFEIFER & HANSON (1965) demonstrou que o painel com algum tipo de conector apresenta desempenho superior a um painel equivalente sem conector. Isto se deve ao fato de que os conectores impedem seguramente os movimentos diferenciais entre as duas placas, caracterizando um comportamento composto ou próximo disso.

2.7.1 CLASSIFICAÇÃO

Existe uma infinidade de tipos de conectores. Cada um apresenta-se mais apropriado para um tipo de painel ou comportamento pretendido. Na maioria das vezes, num único painel encontramos mais de um tipo de conector. Procurou-se relacionar os tipos de conectores que têm sido empregados no mercado de painéis sanduíche segundo a sua capacidade de transmitir o cisalhamento entre as placas.



2.7.2 CONECTORES RÍGIDOS

Conectores rígidos (shear connectors) são aqueles capazes de transferir o esforço cortante (decorrente da flexão do painel) de uma placa a outra, permitindo o funcionamento composto da seção. Em painéis não-compostos, a placa não-estrutural deve ser suportada pela placa estrutural por meio de conectores rígidos. Poderíamos classificar o conector rígido de acordo com as direções em que ele é rígido : em apenas uma ou nas duas direções perpendiculares no plano do painel. O conector rígido numa única direção ainda pode ser concentrado ou contínuo.

2.7.2.1 Conector rígido numa direção :

CONCENTRADOS : São pequenos elementos isolados que transmitem o cisalhamento em apenas uma direção, sendo flexível na outra. Podem ser pequenas barras dobradas, chapa de metal expandida ou luva plana (flat sleeve anchor).

- 1) Quando feitos a partir de barras dobradas, devem ser de preferência de aço inoxidável ou galvanizado como garantia de durabilidade. As barras, com diâmetro de aproximadamente 6 mm, devem ser dobradas a frio e podem ser dispostas em diversas configurações (Figura 8). O funcionamento das barras dobradas na transferência dos esforços é garantido por uma geometria de estrutura indeslocável quando ancoradas nas placas.

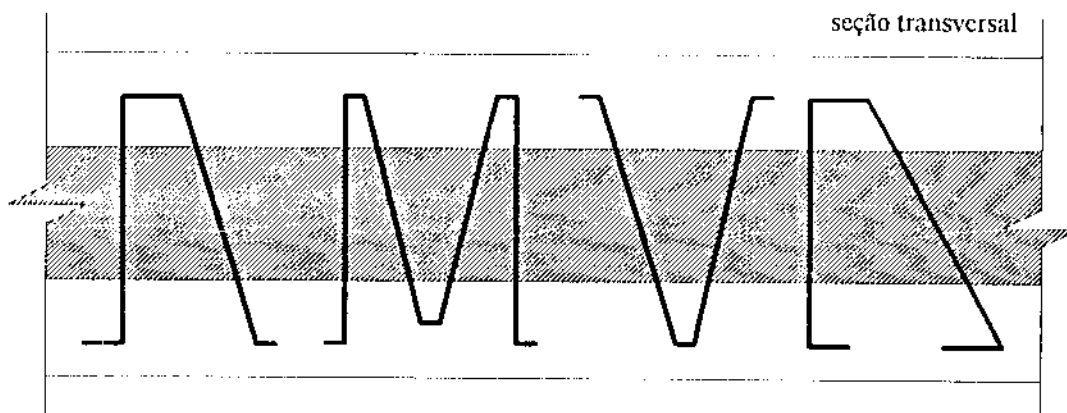


FIGURA 8 – Configurações de barras dobradas como conector rígido concentrado.

- 2) A chapa de metal expandida (Figura 9), é constituída de uma chapa de metal que é perfurada de forma a permitir sua expansão. A altura, em geral, é equivalente à espessura do isolante mais o comprimento suficiente para ancoragem nas placas de concreto; o comprimento é de aproximadamente 20 cm. Em alguns casos, a chapa pode ser “amarrada” nas armaduras das placas e inserida numa fenda do isolante.

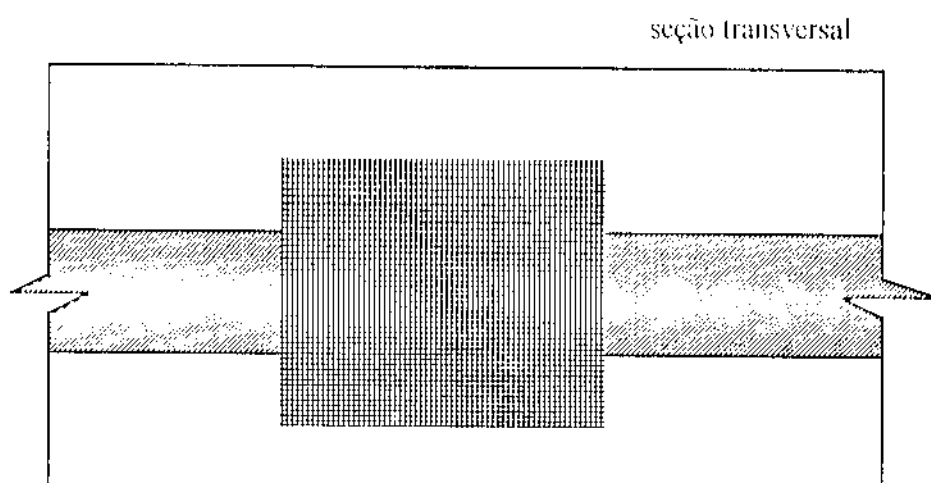
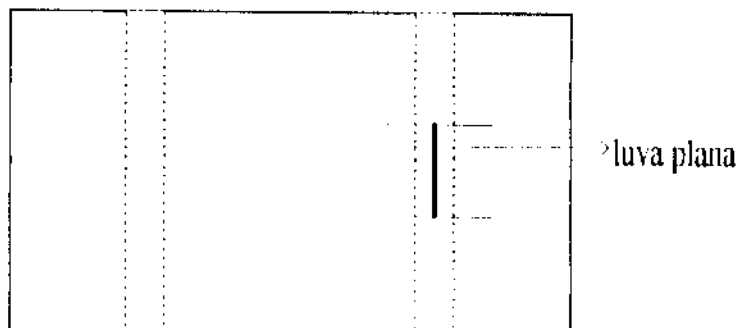


FIGURA 9 – Chapa de metal expandida.

- 3) A luva plana (Figura 10) é constituída de uma placa de metal com quatro barras de aço que garantem a estabilidade e ancoragem da peça no interior do painel. A luva plana foi especialmente projetada para ser usada em painéis PI ou nervurados onde atua em conjunto com conectores rígidos em duas direções (conforme Figura 19). Está disponível no mercado americano em diversas dimensões padronizadas: o quadro da Figura 10 apresenta o esforço de projeto para a luva plana em função de suas dimensões, segundo dados do PCI Manual (1977).

Painel PI
(em planta)



Carga de projeto (kN)	A (cm)	B (cm)
9,07	16	15,5
18,14	32	15,5
27,22	48	15,5
36,29	64	15,5

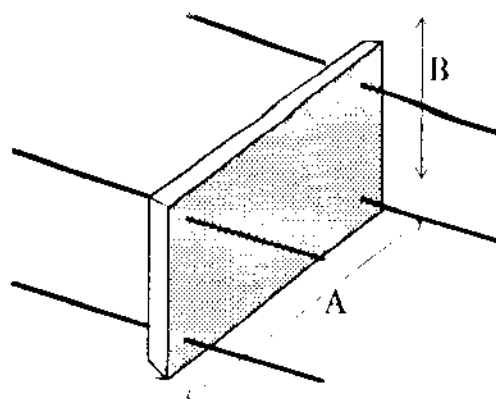


FIGURA 10 – Luva plana.

CONTÍNUOS : São conectores que, na maioria dos casos, são dispostos ao longo de todo o comprimento do painel. O conector contínuo é similar ao conector rígido numa direção concentrado, a diferença é que o primeiro é constituído de peça única e contínua ao longo da extensão do painel. Podem ser de barras dobradas, chapa de metal expandida, treliças metálicas e nervuras (as nervuras de concreto serão estudadas à parte como um tipo especial de conector).

- 1) O conector rígido em uma direção pode ser feito a partir de barras dobradas com as mesmas características das concentradas, só que de forma contínua. A indelocabilidade é garantida pelos pontos de ancoragem nas placas (Figura 11.a).
- 2) Pode-se dispor de chapas de metal expandida (Figura 11.b) de forma contínua ao longo de toda a extensão do painel ou, nos casos de painéis de grandes dimensões, podem ser limitadas a tamanhos segundo critérios construtivos.
- 3) As treliças de aço, segundo alguns tipos comerciais utilizados nos Estados Unidos, possuem duas configurações básicas :

3) As treliças de aço, segundo alguns tipos comerciais utilizados nos Estados Unidos, possuem duas configurações básicas :

- Uma barra como banzo inferior e outra como banzo superior (figura 11.c);
- Duas barras como banzo superior e duas chapas dobradas de pequena espessura como banzo inferior (figura 11.d).

Em ambos os casos, a treliça é firmemente amarrada à armadura da placa.

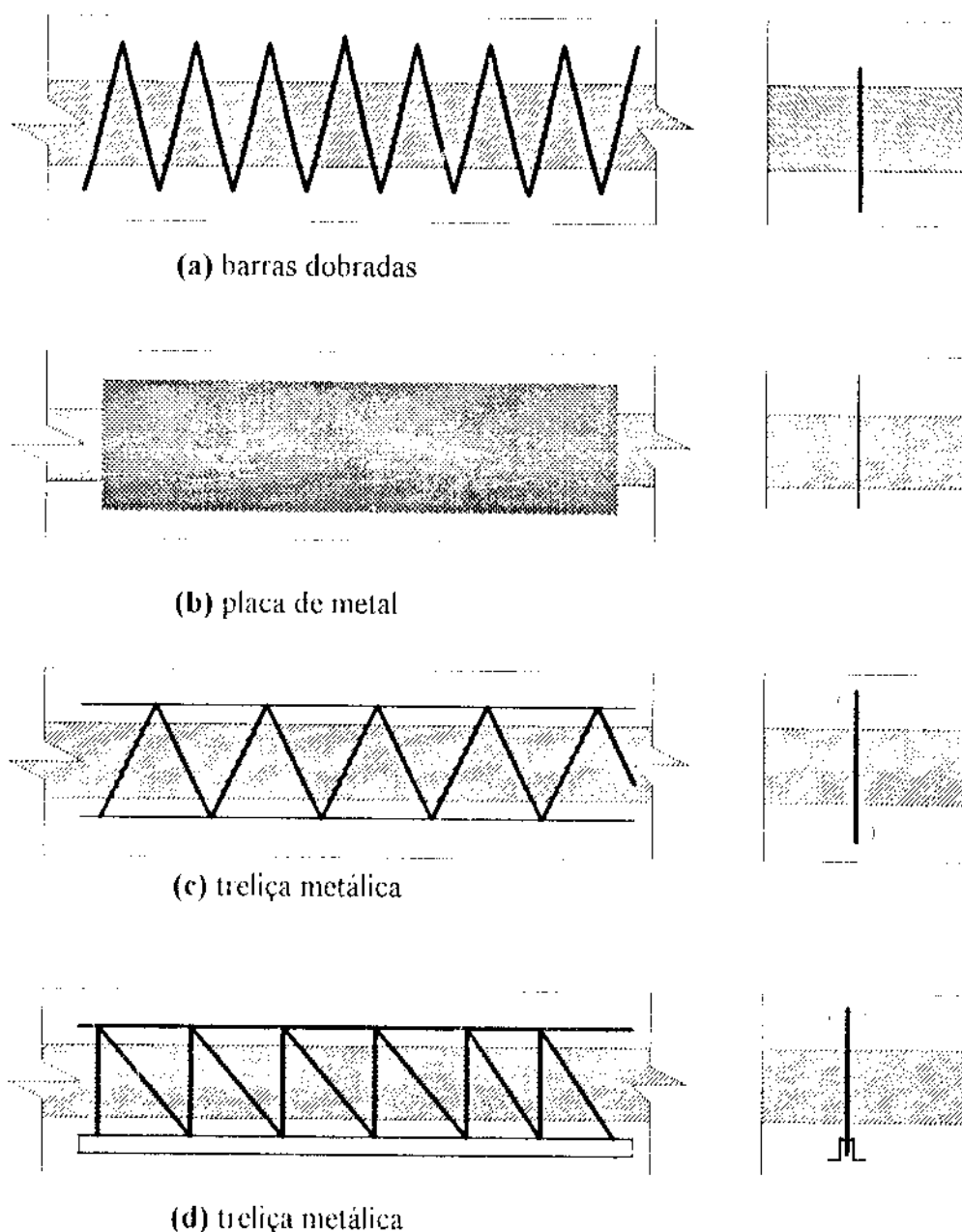


FIGURA 11 – Configurações para conectores rígidos em 1 direção contínuos.

2.7.2.2 Conector rígido em duas direções :

O conector rígido em duas direções apresenta resistência ao cisalhamento nas duas direções perpendiculares. Devido à sua forma, também oferece resistência à torção. Dentre os que podem ser considerados como resistentes em duas direções encontram-se : conector de barra espacial (crown anchor), luva cilíndrica (cylindrical sleeve anchor) e pequenos blocos de concreto moldados no local.

- 1) Conector de barra espacial é feito a partir de barras de aço numa configuração tridimensional (Figura 12). É um tipo de conector pouco utilizado nos Estados Unidos, seu uso é mais difundido na Europa.
- 2) Luva cilíndrica é constituída de um cilindro (com até 50 cm de diâmetro) feito em chapa metálica (0,9mm) com até 8 barras de aço que promovem a ancoragem nas placas do painel. Este tipo de conector é bastante utilizado em painel não-composto onde transmite o peso da placa não-estrutural para a placa estrutural. Na Figura 13 apresenta-se a configuração geral da luva cilíndrica que está disponível no mercado norte-americano. No quadro anexo, são relacionadas as resistências de projeto segundo esses tamanhos padronizados.

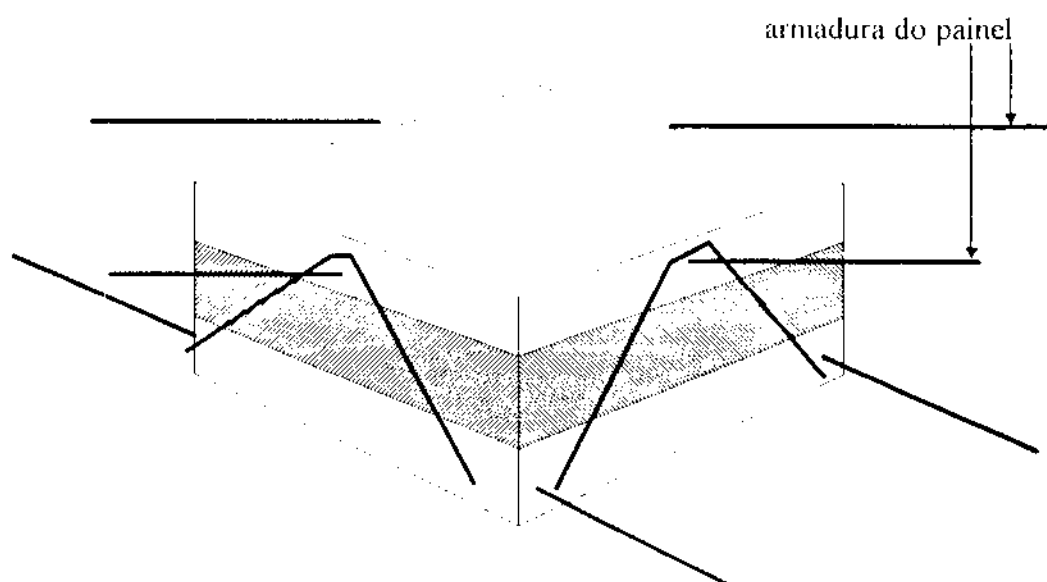


FIGURA 12 -- Conector de barra espacial

Carga de projeto (kN)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Barras
9,07	5,1 - 6,4	12,7 - 15,6 - 19	4 ϕ 6,3 - 51 cm
18,14	10,2 - 11,4	12,7 - 15,6 - 19	4 ϕ 6,3 - 51 cm
27,22	15,2 - 16,5	12,7 - 15,6 - 19	8 ϕ 6,3 - 71 cm
36,28	20,3 - 21,6	12,7 - 15,6 - 19	8 ϕ 6,3 - 71 cm

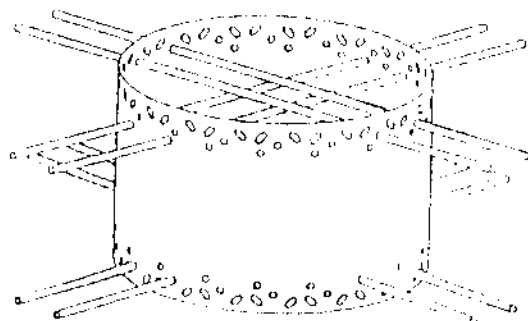


FIGURA 13 – Luva cilíndrica.

2.7.3 CONECTORES FLEXÍVEIS

Conectores flexíveis (non-shear connectors) são conectores de função apenas construtiva. Esses conectores devem ser flexíveis quando se trata de deformação na direção paralela ao plano do painel, mas devem possuir resistência suficiente para suportar esforços cíclicos na direção perpendicular ao plano do painel, principalmente esforços de tração.

Em painéis não-compostos, os conectores flexíveis são utilizados para impedir a separação entre as placas e a flambagem localizada da placa não-estrutural. Em painéis compostos, é usado principalmente para aumentar os pontos de ligação entre as placas. É muito importante a avaliação da forma como o conector será instalado para não prejudicar a simplicidade do processo de moldagem. No item 2.7.6.3 são apresentadas algumas formas de instalação de conectores flexíveis segundo a prática americana. Sua classificação resume-se ao material do qual ele é feito : metal ou plástico .

2.7.3.1 Conector metálico

Segundo EINEA et al. (1991), os conectores metálicos mais populares são os pinos com 2 a 2.7 mm de diâmetro, feitos de barras de aço inoxidável ou galvanizado em diversas configurações (Figura 14). Pode-se construir conectores flexíveis com pequenas barras soldadas semelhante a uma treliça numa configuração deformável que não oferece resistência ao cisalhamento. No caso da armadura ser de tela soldada, podem ser constituídos de uma pequena extremidade da tela que é cortada e dobrada para servir como conector (Figura 14).

A ancoragem dos pinos é feita por dobramento de sua extremidade. Os conectores flexíveis de metal podem, se necessário, ser ancorados na armadura da placa inferior (Figura 14). De qualquer modo, a ancoragem precisa ser garantida para que o conector funcione eficientemente sob tração. Os esforços de compressão são absorvidos pelo isolante que transfere a pressão recebida à outra placa.

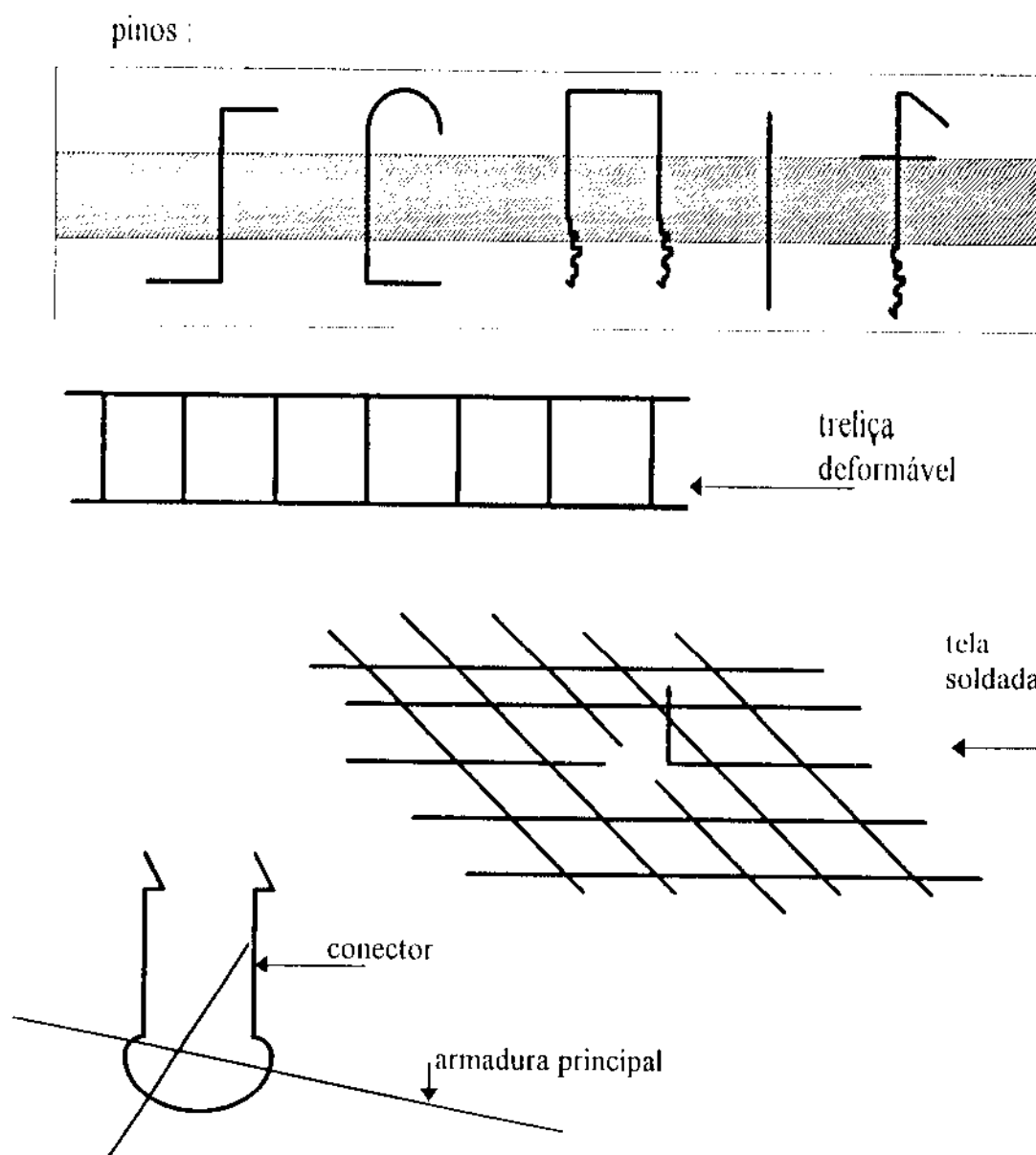


FIGURA 14 – Configurações dos conectores flexíveis de metal .

2.7.3.2 Conector plástico

Os conectores flexíveis de plástico são pinos que podem ser reforçados com fibra. A vantagem maior do conector de plástico é que em locais de umidade alta, este tipo de conector dificulta a condensação interna no local. Entretanto, a resistência ao fogo do painel precisa ser mais cuidadosamente avaliada.

Nos E.U.A. , são usados dois tipos de conectores plásticos (EINEA et al. , 1991) :

Pino de polipropileno não reforçado (Figura 15.a) .

Pino de resina vinilester reforçado com fibra de vidro (Figura 15.b) .

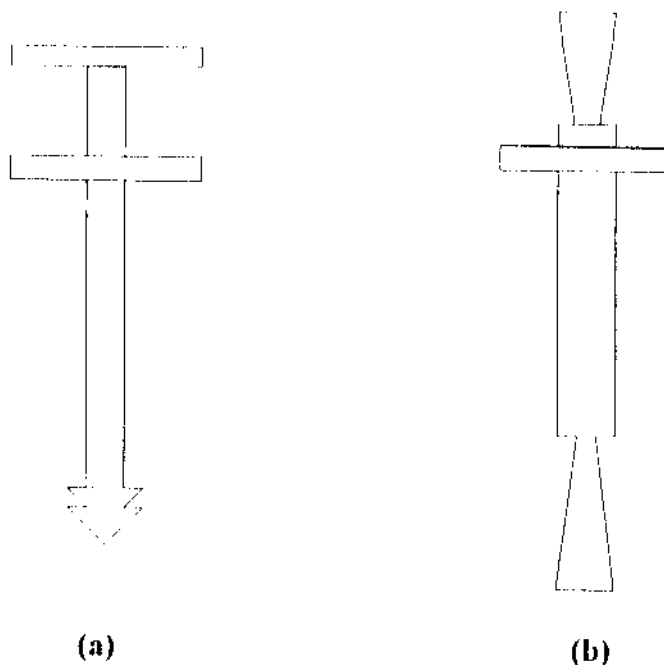


FIGURA 15 – Conectores flexíveis de plástico.

2.7.4 NERVURAS E BLOCOS DE CONCRETO

Uma forma bastante utilizada de conectores rígidos são as nervuras constituídas do concreto da própria placa (Figura 16). Um outro tipo de conector são os blocos de concreto distribuídos uniformemente na superfície do painel (Figura 17). As nervuras são, na verdade, conectores rígidos em uma direção contínuos e os blocos são conectores rígidos em duas direções. Preferiu-se estudar estes tipos de conectores em separado devido ao fato destes serem incorporados à placa, uma vez que são moldados ao mesmo tempo.

Os blocos de concreto constituem pontos de ligação rígida entre as duas placas. São moldados por meio de pequenos vazios deixados no isolante que são preenchidos durante o processo de moldagem da placa superior. Os blocos são excelente local para posicionar as alças para manuseio do painel (Figura 17).

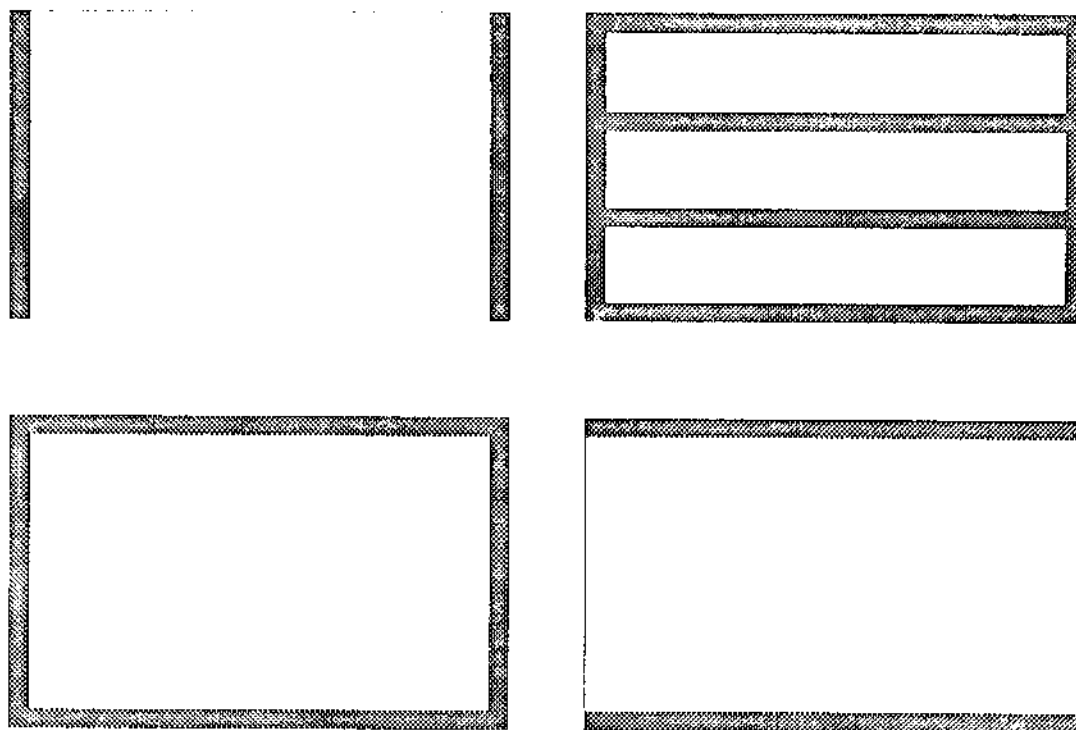


FIGURA 16 – Painéis com nervuras como conector rígido.

Nervuras de concreto promovem uma melhora no comportamento estrutural quando comparado com conectores metálicos, mas reduzem a eficiência térmica do painel devido à menor área disponível de isolante (elevada quantidade de pontes térmicas). A distribuição ou localização das nervuras é o ponto chave para não haver perda excessiva de isolamento térmico. Uma forma de reduzir a perda de isolamento térmico seria posicionar a nervura inferior na fundação.

Um problema apresentado no uso de nervuras seria a restrição indesejada de movimentos entre as duas placas (sujeitas a deformações diferenciais) com riscos de fissuração. Dependendo da situação e da forma como o painel foi calculado, a restrição de movimentos entre as placas é vantajoso quando se busca um painel de comportamento composto.

O PCI Manual (1977) não recomenda o uso de nervuras justamente pelos dois motivos abordados nos parágrafos anteriores : perda elevada de isolamento térmico e restrição indesejada em painéis não-compostos. Ainda alerta para o risco de

condensação local nas nervuras. Entretanto, o próprio PCI Manual (1977) cita que o uso de nervuras é bastante difundido entre os produtores americanos.

O que parece ser o grande problema das nervuras é a perda de isolamento térmico. No caso de locais com inverno pouco rigoroso, como é o caso do Brasil, não apresentaria maiores problemas. O inconveniente da restrição de movimentos na verdade é uma vantagem para painéis compostos.

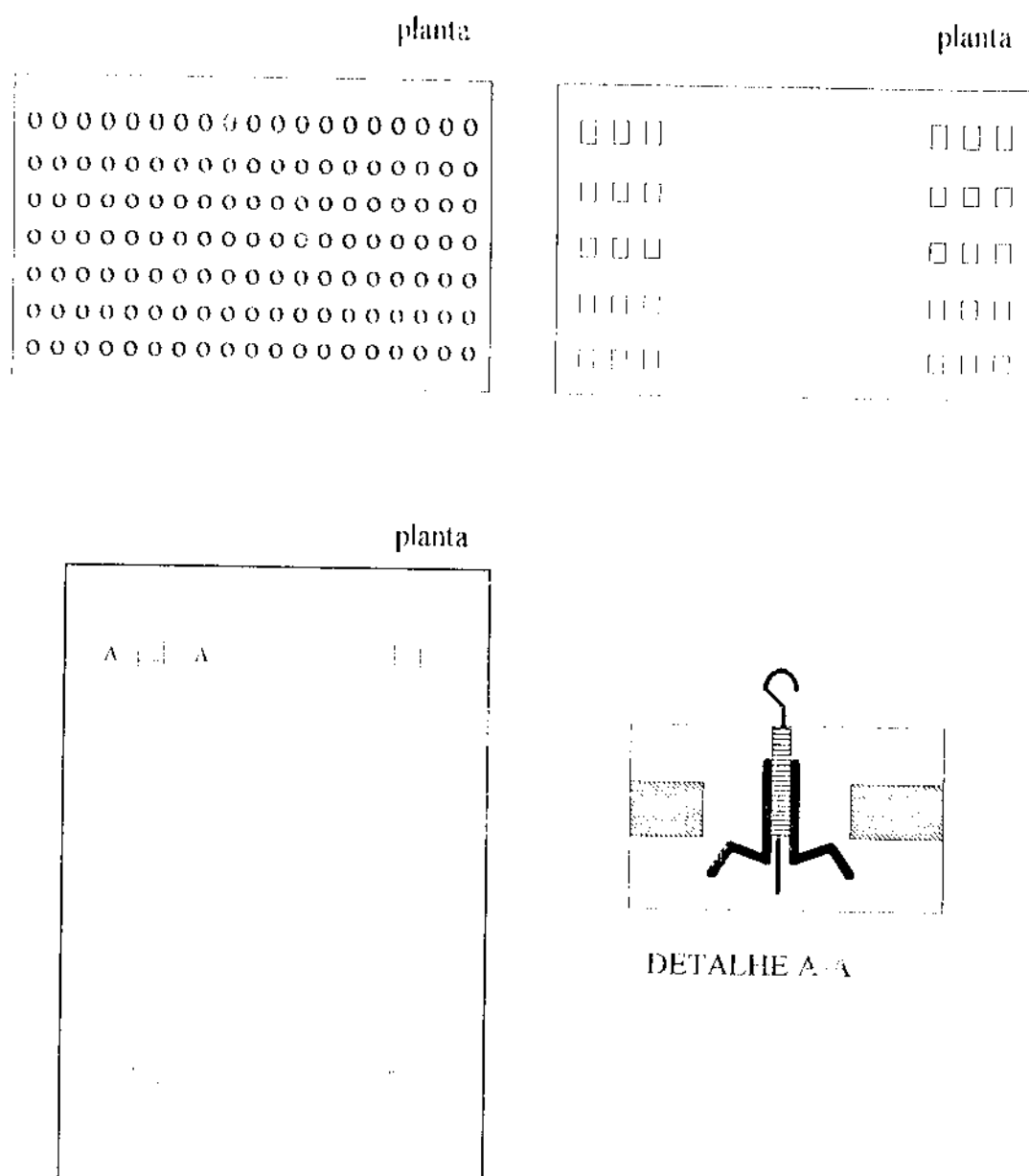


FIGURA 17 - Painéis com blocos de concreto como conector rígido.

Nos ensaios realizados por BASUNBUL & AL-SULAIMANI (1991) somente com painéis nervurados concluiu-se que o número de nervuras e sua armadura é muito importante para se obter composição total. Entretanto, aumentando-se o número de nervuras e a armadura além de um mínimo necessário, não melhora significativamente o comportamento à flexão do painel em nenhum dos três estádios (Estádio I, II, III).

Portanto, um estudo a cerca do número de nervuras e quantidade de armadura para um certo tipo de painel é muito importante do ponto de vista econômico, pois impede exageros e desperdício de material que não contribuem para a capacidade resistente do painel .

Alguns ensaios foram realizados por PFEIFER & HANSON (1965) como a finalidade de analisar o uso de alguns tipos de conectores. Foram estudadas diversas disposições de nervuras e blocos de concreto para se chegar a uma eficiência estrutural máxima com mínima perda de isolamento. O uso de pequenos blocos de concreto distribuídos uniformemente ao longo da superfície do painel parece ser uma forma bastante eficiente de conexão entre placas.

2.7.5 DISPOSIÇÃO DOS CONECTORES

A disposição, quantidade e espaçamento dos conectores variam de acordo com o grau de composição desejado. Algumas recomendações de ordem prática, já bastante utilizadas por diversos construtores, devem ser seguidas para minimizar o efeito da flexão do painel. (PCI Manual, 1977; EINEA et al., 1991; PCI Design Handbook, 1992).

1. O espaçamento dos conectores flexíveis, medidos de eixo a eixo, deve ser preferencialmente em torno de 60 cm, e de forma alguma deve superar 120 cm ou menos que dois conectores por metro quadrado de área do painel (Figura 18);
2. Em torno do perímetro do painel e em torno de aberturas maiores que 60 cm, deve-se limitar o espaçamento entre conectores a 60 cm (Figura 18);
3. Deve-se usar uma combinação de conectores rígidos complementada com conectores flexíveis com a finalidade de evitar que as placas se separem durante a ação de cargas de vento e no processo de desfôrma (Figura 18).

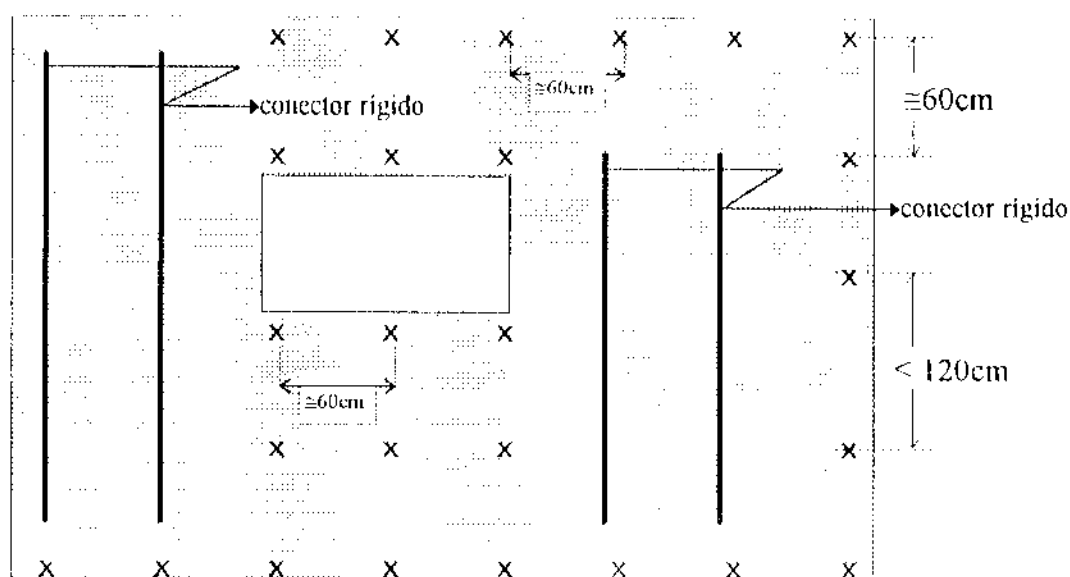


FIGURA 18 – Disposição dos conectores flexíveis.

(x = conectores flexíveis)

4. Em painéis PI não-compostos, é recomendado o uso de uma luva cilíndrica numa das nervuras e uma luva plana com mesma resistência ao cisalhamento vertical na outra nervura, no mesmo nível horizontal (Figura 19). Em casos de painéis com múltiplas nervuras, deve-se manter a luva cilíndrica numa das nervuras (o mais próximo possível do centro) e luvas planas nas demais nervuras.

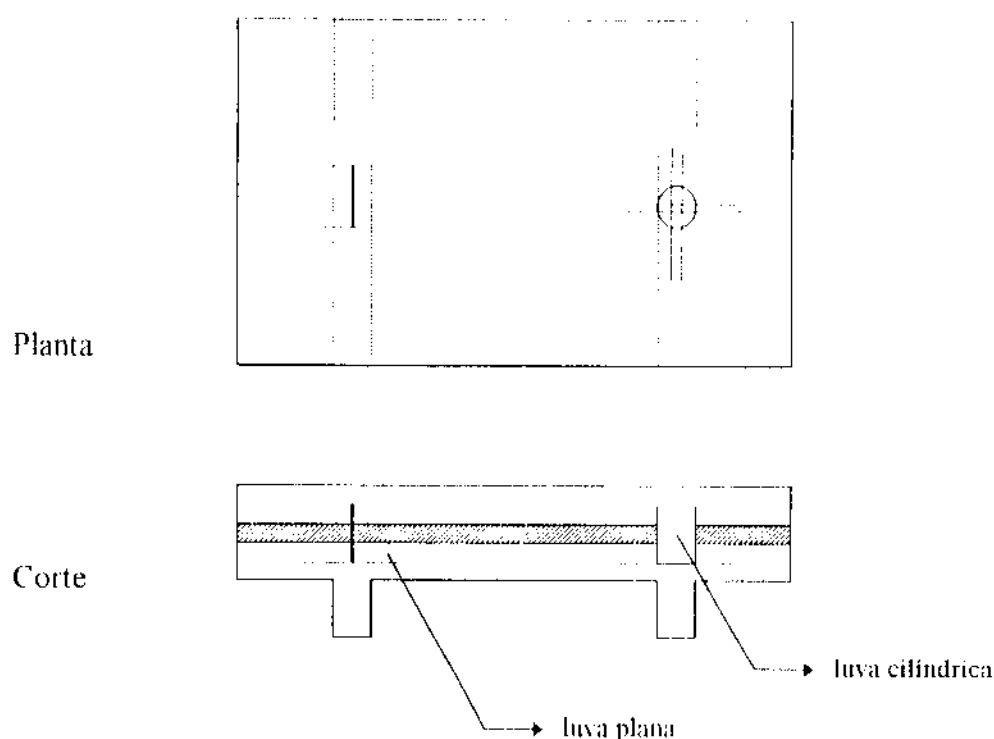


FIGURA 19 – Disposição dos conectores em painéis nervurados não-compostos.

5. Em painéis não-compostos, o conector rígido em duas direções que liga a placa não-estrutural à placa estrutural deve ser um único elemento situado o mais próximo possível do centro de gravidade do painel (Figura 20). Agindo assim, as tensões devido à variação de volume serão minimizadas ou evitadas pois a placa não-estrutural possuirá liberdade de movimentos. Nos casos em que não se puder seguir esta recomendação, seria interessante limitar o movimento diferencial entre as placas a um máximo de 3 mm.

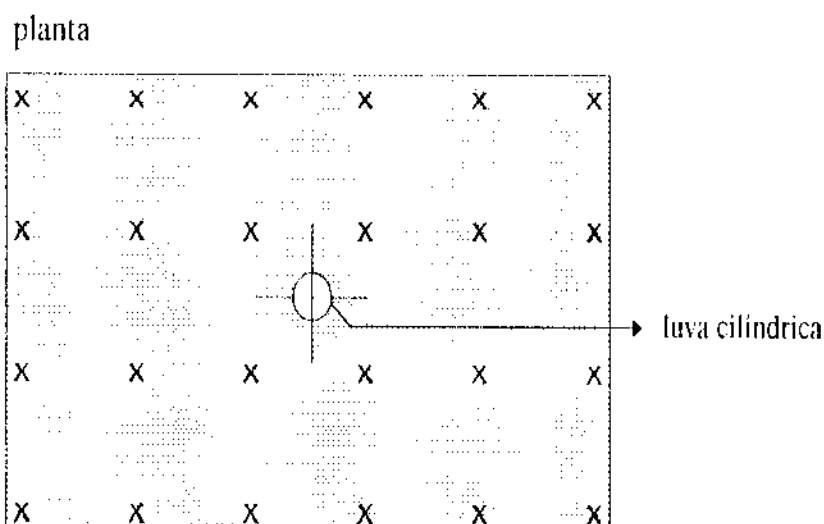


FIGURA 20 – Disposição do conector rígido em duas direções para painéis não-compostos (x = conectores flexíveis) .

6. Conectores rígidos em uma direção também podem ser usados em painéis não-compostos, orientando-os ao longo dos dois eixos perpendiculares principais do painel. Desta forma restringe-se o cisalhamento e uma parcela do momento de torção sem impedir o funcionamento não-composto entre as placas (Figura 21) .

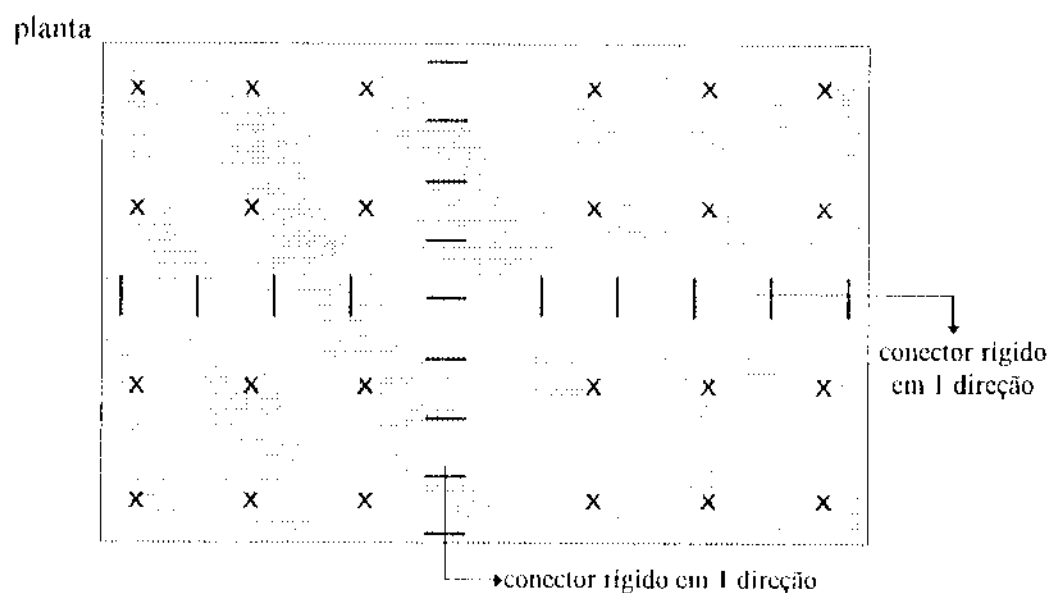


FIGURA 21 – Disposição de conectores rígidos em uma direção para painéis não-compostos (x = conectores flexíveis) .

2.7.6 INSTALAÇÃO DOS CONECTORES

Os conectores podem ser instalados de diversas maneiras. Na maioria dos casos, a instalação é feita sobre a placa inferior ainda fresca e, depois de posicionado o isolante, a placa superior é moldada de forma a incorporar os conectores. Para um melhor entendimento, a seguir será detalhada como seria a instalação de cada grupo de conectores.

2.7.6.1 Barras de aço

Para os conectores constituídos de barras de aço –de forma concentrada ou contínua– e treliças metálicas, recomenda-se que este tipo de conector seja ancorado na armadura principal da placa inferior ainda antes da moldagem. Na instalação do núcleo de isolante, devem ser tomadas as precauções a respeito da infiltração de argamassa. Após a instalação do isolante, a armadura da placa superior deve também ser ancorada na extremidade dos conectores. Assim, quando for moldada a placa superior, os conectores estarão rigidamente ancorados em ambas as placas.

2.7.6.2 Chapa de metal e luvas

A chapa de metal expandida e a luva plana podem ser instaladas diretamente sobre o concreto fresco da placa inferior de forma que haja uma penetração mínima para garantir a ancoragem adequada. Novamente o núcleo de isolante deve possuir as aberturas correspondentes à passagem dos conectores, e a placa superior pode ser moldada cobrindo-se assim o conector.

2.7.6.3 Conectores flexíveis

Os conectores flexíveis, de metal ou plástico, podem ser instalados diretamente através do isolante, já disposto sobre a placa inferior recém-moldada, de forma que o pino perfura o isolante e ancora na placa inferior de concreto ainda fresco. Outra forma de instalar os pinos pode ser dispondo-se todos os pinos através do isolante para então colocar-los sobre a placa inferior ainda fresca, quando então todos os conectores penetrariam de uma só vez na placa. Em ambos os métodos, a ancoragem dos pinos na placa superior seria no momento de sua moldagem sobre o isolante e envolvendo a extremidade superior dos pinos.

Uma outra maneira difundida de se instalar os pinos assemelha-se à forma de instalar os conectores rígidos de barras de aço: os pinos são ancorados na armadura principal da placa inferior para só então o painel ser moldado.

2.7.6.4 Nervuras / blocos

A forma mais simples para moldagem das nervuras e blocos isolados de concreto seria dispor o espaço necessário para a nervura/bloco no próprio isolante, que após ser instalado sobre a placa inferior, serviria de fôrma para as nervuras ou blocos. Assim, as nervuras/blocos seriam moldados junto com a placa superior.

2.8 SISTEMAS CONSTRUTIVOS COM PAINÉIS SANDUÍCHE

2.8.1 SISTEMA COM MOLDAGEM POSTERIOR DAS PLACAS

Trata-se de um sistema constituído de um pré-painel de material isolante (geralmente poliestireno ou poliuretano) que recebe revestimento somente após a montagem dos pré-painéis na obra. As placas são armadas com tela soldada disposta em cada uma das faces do isolante e ligadas por meio de barras eletrosoldadas. O revestimento de pode ser efetuado por meios tradicionais de emboçamento ou por processos mais modernos que empregam mecanismos de jateamento da argamassa sob pressão. Uma característica deste sistema é a continuidade da armadura de painel a painel antes de serem moldadas as placas. Este fato garante uma estrutura monolítica e bastante resistente.

Segundo PICKARD (1990), quatro fabricantes produzem painéis utilizando este sistema nos Estados Unidos (Tabela 2) e outros quinze são encontrados fora dos Estados Unidos. Dentre os vários sistemas, descrevemos a seguir as características particulares de alguns.

TABELA 2 - Especificações dos painéis utilizados nos E.U.A.

Tipo	espessura total (mm)	largura (mm)	altura (mm)	tipo de isolante	espessura do isolante
A	76,2 / 101,6 / 127 / 152,4	1220	1830 - 12190	poliuretano	12,7 / 114,3
B	76,2 / 101,6	1220	2440 - 7315	poliestireno	50,8 / 76,2
C	50,8 / 76,2	1220	1830 - 4880	poliuretano	12,7 / 50,8
D	76,2	1220	2440	poliestireno	57,2

2.8.1.1 Cabrini Monolite⁴

O sistema MONOLITE já havia sido utilizado em vários países europeus : Alemanha, Espanha, França, Inglaterra, Itália. Na América do Sul, foi utilizado inicialmente na Argentina e posteriormente foi trazido para o Brasil. O painel CABRINI MONOLITE utilizado no Brasil é constituído de um pré-painel de poliestireno expandido recortada em formato ondulado. Sua forma especial permite que após a concretagem, mini-pilares sejam formados a partir do molde ondulado do poliestireno.

2.8.1.2 Polywall

O sistema POLYWALL, utilizado em Singapura como parede divisória interna em residências, foi motivo de estudo de LEE et al. (1986) que buscava aumentar a resistência do painel para estender o seu uso a paredes externas. As placas podem ser moldadas por jateamento da argamassa ou por processos tradicionais, dependendo da disponibilidade de equipamentos. A armadura das placas mantém uma distância do núcleo de poliestireno (variável de acordo com a série de ensaios). A ligação entre as placas ainda podia ser reforçada com nervuras armadas com treliça metálica.

2.8.1.3 W-Painel

O sistema W-painel, desenvolvido nos Estados Unidos, apresenta como diferença dos demais painéis desenvolvidos sob a mesma idéia o fato do isolante ser moldado após a preparação da estrutura tridimensional de aço. O poliuretano utilizado como isolante é injetado entre a estrutura de aço com "folga" de 12,7 mm de

⁴ CABRINI MONOLITE Ind. e Com. Ltda. – **Material promocional** – 1993

cada lado. Esta folga serve de cobrimento para a armadura no lado em contato com o isolante. Assim, a espessura total de cada face do painel fica com cerca de 22 mm. O sistema W-painel, como nos demais sistemas similares, apresenta resistência superior a abalos sísmicos.

2.8.1.4 Insteel⁵

Insteel Construction Systems é uma empresa sediada na Georgia, Estados Unidos. O sistema da INSTEEL é caracterizado pelo uso de equipamento de projeção de mistura seca sob pressão para moldagem das placas. Este equipamento requer mão-de-obra qualificada para ser operado. A armadura e os conectores são de aço inoxidável e estão dispostos numa configuração tridimensional que dá maior rigidez ao conjunto após a moldagem das placas.

2.8.2 SISTEMA COM PAINÉIS DE GRANDES DIMENSÕES

Os sistemas construtivos com painéis de grandes dimensões foram concebidos em países desenvolvidos que procuravam resolver os problemas habitacionais através da industrialização na Construção Civil.

HALÁSZ (1972), descreve alguns sistemas utilizados na Alemanha com painéis de grandes dimensões. A maioria dos projetos eram originários de outros países europeus e foram adaptados às normas técnicas da Alemanha. Esses sistemas são bastante antigos e utilizavam placas de concreto com espessuras que pareciam ser exageradas. Na verdade, a espessura elevada, além de satisfazer a necessidade estrutural, também contribuía com o isolamento térmico da habitação. Aliás, a particularidade de cada sistema estava nas ligações entre painéis, onde se buscava uma

⁵ Insteel Construction Systems – **Folheto de produtos** – Correspondência pessoal, 1993.

melhor maneira de dar continuidade ao isolamento.

Outros sistemas mais modernos empregam placas com espessuras bem inferiores aos utilizados na Alemanha. Principalmente nos Estados Unidos, os projetos utilizam estruturas mais leves.

2.8.2.1 Sistema Camus-Dietsch

Este sistema foi desenvolvido na França e apresentado em 1964 numa exposição na Alemanha. Os painéis eram responsáveis pela resistência a esforços verticais e horizontais. Nos painéis externos, a placa não-estrutural era armada com 1,5 a 2,5 kg/ m² de armadura para controle da retração; a placa estrutural variava entre 14 a 18 cm de acordo com a necessidade estrutural e o isolante possuía apenas 3 cm.

2.8.2.2 Sistema Larsen & Hammers

Sistema de edificações altas constituídas de painéis de grandes dimensões e núcleo rígido de contraventamento para resistir a cargas horizontais. Neste sistema, apenas os painéis externos eram tipo sanduíche. Com espessura total de 19 cm, o painel tinha comportamento não-composto com placa estrutural de 8 cm constituída de concreto de alta resistência e isolante de 5 cm de poliestireno. A placa não-estrutural era pouco armada e ligada à placa estrutural por meio de quatro conectores de aço inoxidável.

2.8.2.3. Factory-built ferrocement home (CHANG, 1983)

Este sistema foi desenvolvido nos Estados Unidos com incentivo do Governo Federal que no início da década de 70 subsidiou o desenvolvimento e

construção de casas populares para atender a uma demanda crítica por habitações daquela época. Proposto por CHANG (1983), era produzido e montado inteiramente na fábrica em dois módulos que eram transportados em carretas para o local definitivo. O tamanho total da habitação era 7,10 x 14,33 m.

Os painéis, com espessura total variando entre 50,8 mm e 152,4 mm conforme a aplicação (parede interna ou laje de piso respectivamente), possuíam duas placas de 12,7 mm de espessura constituída de argamassa armada e núcleo isolante composto de “caixas de papelão” que funcionavam como forma perdida entre nervuras.

seção transversal

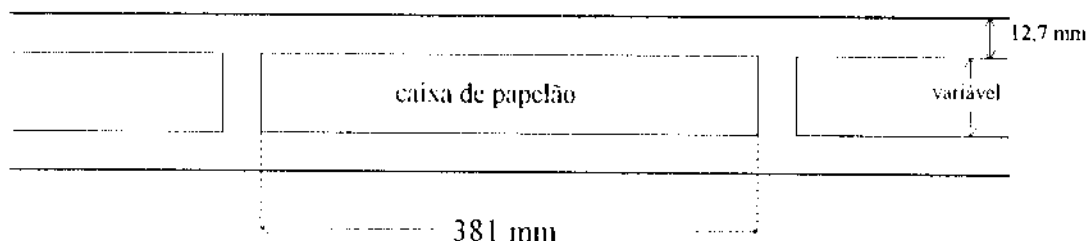


FIGURA 22 – Disposição da “caixa de papelão” no painel de CHANG (1983).

O processo de produção dos painéis era bastante simples : consistia em moldar a placa inferior em mesa vibratória e dispor o isolante sobre a placa de concreto ainda fresco. No momento da moldagem da placa superior, nervuras regularmente espaçadas eram moldadas entre as “caixas de papelão” .

Posteriormente, CHANG & NANNI (1985) apresentaram algumas modificações nesse sistema e propuseram o uso de resíduo da indústria de fertilizantes (phosphogypsum) na composição da argamassa. A espessura de cada placa passou a 9,5 mm e utilizou-se núcleo de poliestireno como isolante. Nessa nova versão, a habitação era composta de módulos de 2,13 por 4,26 m.

2.8.2.4 Sistema desenvolvido por WANG (1985)

Um projeto construído em 1977 consistia de painéis de grandes dimensões para edifícios de cinco pavimentos. O sistema estrutural consistia de painéis de contraventamento associados com estrutura de pórticos rotulados. Os pórticos, embora projetados para resistir somente a cargas verticais, tinham –por medida de segurança– capacidade para resistir até 10 % do esforço horizontal.

Os painéis, constituídos de argamassa armada, mediam 3,5 x 5,0 m. O painel de piso é nervurado com protensão aplicada nas nervuras. A sobrecarga considerada no projeto foi de 2,5 kN/m². Aliás, este valor tinha uma boa margem de segurança, uma vez que nos ensaios, a primeira fissura surgiu com 5,85 kN /m².

O isolante era utilizado somente nos painéis externos e na laje superior. Esses eram constituídos a partir de resíduo industrial (foamed powder coal ash) como maneira de reduzir o custo.

2.8.3 SISTEMAS ALTERNATIVOS

2.8.3.1 Sistema desenvolvido por NICHOLLS (1991)

Sistema patenteado por NICHOLLS (1991) é adequado para produção de painéis de pequenas dimensões que utilizam argamassa armada na confecção das placas. A sequência do processo pode ser resumida em :

1. Envolver uma pré-painel de poliestireno expandido em malha de polipropileno;
2. Mergulhar o pré-painel numa argamassa especial composta de látex;
3. Empilhar os painéis para secar utilizando um filme de polietileno entre painéis com a finalidade de evitar a aderência de painéis sobrepostos.

O látex utilizado na argamassa tinha a finalidade de aumentar a aderência com o isolante de poliestireno expandido.

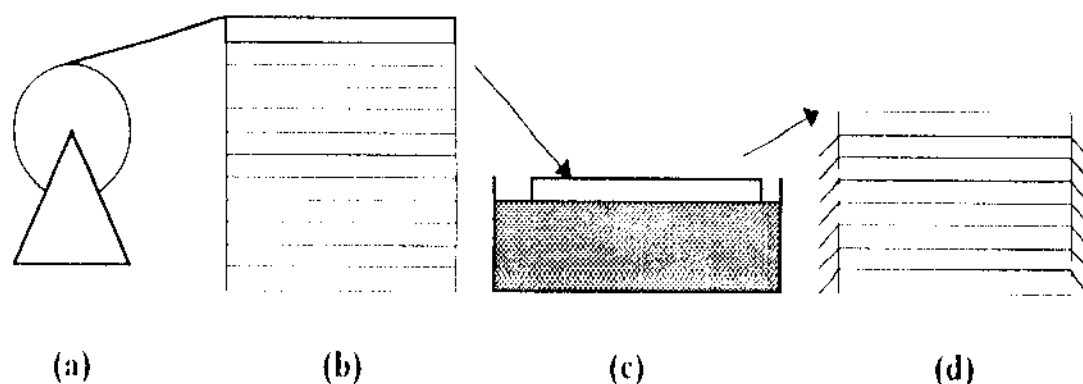


FIGURA 23 Representação esquemática do sistema apresentado por NICHOLLS.

(a) rolo com a tela de polipropileno; (b) pré-painéis prontos para moldagem das placas; (c) moldagem das placas por imersão em argamassa; (d) painéis em processo de cura separados por filme de polietileno.

Os painéis podiam ser dimensionados visando um peso mínimo ou um custo mínimo de acordo com seis modos de ruptura previstos :

1. Ruptura das faces do painel (por compressão ou tração);
2. Ruptura por cisalhamento no núcleo;
3. Quebra da aderência entre placas e núcleo;
4. Esmagamento local do núcleo devido a carga concentrada na face;
5. Deflexão excessiva do painel;
6. Flambagem localizada na face comprimida.

2.8.3.2 Sistema desenvolvido por MACHADO JÚNIOR (1991)

O sistema desenvolvido por MACHADO JÚNIOR (1991) em tese de doutorado foi testado em embrião que constava de sala-quarto, banheiro, cozinha e área coberta para o tanque com dimensão total de 3,5 x 7,0 m. O projeto ainda permitia futura ampliação a 7,0 x 7,0 m.

O sistema construtivo era baseado em dois elementos estruturais : painéis tipo sanduíche e nós de ligação tipo I, T e L para união de painéis . Os painéis sanduíche tinham dimensões determinadas pela modulação : 247 x 44,8 cm e placas com espessura de 11 mm.

A característica principal desse sistema era a sequência de moldagem dos painéis : as duas placas de argamassa armada eram moldadas e curadas normalmente para então o núcleo de poliuretano ser expandido entre as placas de face no interior de uma fôrma apropriada.

A injeção do poliuretano entre as placas de argamassa garantia a aderência necessária entre placas-isolante, uma vez que o painel não possuía conectores. Esta aderência mostrou-se forte bastante para proporcionar um bom desempenho estrutural do painel. O grau de composição entre as placas dependia do módulo de elasticidade transversal do poliuretano.

2.8.3.3 Sistema STUCANET

Trata-se de um sistema desenvolvido na Bélgica onde uma estrutura metálica principal servia de esqueleto para dois painéis paralelos de vedação. Esses painéis são constituídos essencialmente de placas de papelão entrelaçada com tela de aço. No sistema STUCANET, não só as placas de argamassa, mas todo o painel é montado posteriormente na obra.

Depois de pronta a estrutura portante principal, as placas STUCANET são usadas para “cobrir” todas as paredes da habitação. O painel externo é então revestido com argamassa em ambos os lados como garantia de rigidez e durabilidade à parede. Antes do fechamento com o segundo painel, o espaço geralmente é preenchido com material isolante. O painel interno é disposto paralelamente ao primeiro quando é revestido de argamassa para acabamento final e proteção ao isolante (Figura 24).

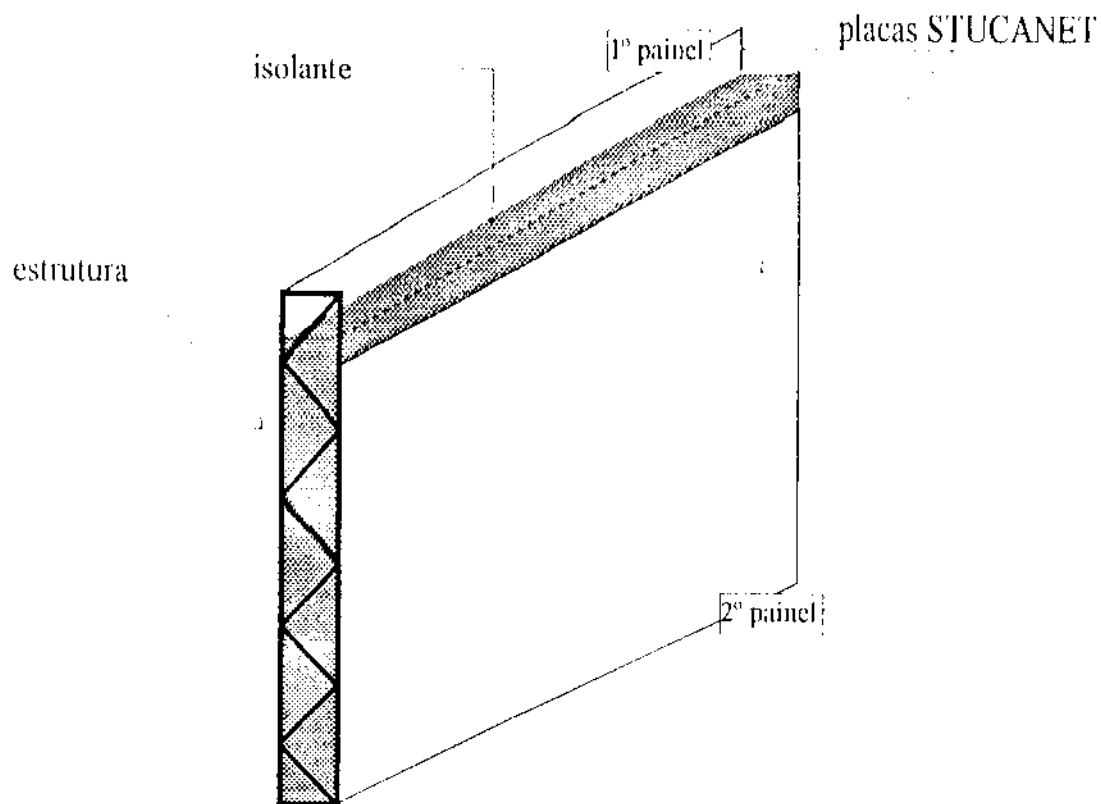


FIGURA 24 -- Painel STUCANET (ROBLES-AUSTRÍACO, 1983).

2.8.3.4 Sistema desenvolvido por SUN et al. (1985)

Sistema constituído de quatro módulos diferentes de painéis que permitiam a "montagem" de um edifício de quatro pavimentos com dois apartamentos por andar. Os módulos eram distribuídos da seguinte maneira : 140 x 244 cm ; 70 x 244 cm ; 50 x 106 cm ; 50 x 244 cm, ambos com placas de 25 mm de espessura.

As instalações hidráulicas foram concentradas em apenas dois painéis de forma que eram montadas durante a moldagem do próprio painel.

O núcleo de isolante era composto de uma "caixa de papelão" que podia ser revestida de poliestireno expandido para melhorar o isolamento térmico. Este procedimento era efetuado nos painéis externos do edifício.

As ligações entre painéis eram feitas com concreto moldado no local.

3 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

3.1 INTRODUÇÃO

Como procedimento inicial, é preciso avaliar a magnitude dos esforços em cada um dos painéis participantes da estrutura portante. O estudo da distribuição de cargas laterais em painéis de contraventamento é feito com base no critério elástico. Esta distribuição não será estudada neste capítulo, será tratado apenas o dimensionamento do painel em si.

No dimensionamento dos painéis sanduíche será utilizada a teoria usual do concreto armado. A seção transversal, considerando a composição total entre as placas, poderá ser tratada como outra qualquer. Embora não tenham sido tratados especificamente, coeficientes de segurança permitem que painéis parcialmente compostos possam ser dimensionados com a mesma teoria.

No dimensionamento de peças pré-moldadas, é preciso fazer a distinção entre duas situações de cálculo bem diferentes. Principalmente em se tratando de painéis de grandes dimensões, a diferença na natureza dos esforços envolvidos é mais acentuada. Podemos classificar as seguintes condições de cálculo :

1. Condições de projeto: do processo de fabricação até a montagem do elemento.
2. Condições de serviço: após a montagem (quando atuam somente ações externas).

3.2 CONDIÇÕES DE PROJETO

Como condições de projeto, pretende-se considerar os esforços decorrentes do processo de fabricação e das etapas de desfôrma, transporte e montagem do painel. Esses esforços precisam ser analisados de forma particular, uma vez que a resistência do concreto nessas etapas iniciais ainda é baixa e os pontos de apoio em geral não são os mesmos da posição definitiva do painel. As condições e critérios definidos neste item referem-se exclusivamente a painéis pré-moldados. Diversos fatores influem na valor dos esforços a serem considerados nas etapas iniciais (PCI Design Handbook, 1992) :

Fatores que influem na desfôrma :

- posição do painel (horizontal, vertical ou inclinado);
- sucção da fôrma e impacto;
- número de pontos de içamento;
- peso do painel;
- área de contato entre painel e fôrma.

Fatores que influem no manuseio e estocagem :

- orientação do painel;
- posição dos pontos de apoio temporários;
- localização;
- posição em relação ao sol.

Fatores que influem no transporte :

- orientação do painel;
- posição de apoio vertical e horizontal;
- condições gerais do veículo e da estrada;
- efeitos dinâmicos.

Fatores que influem na montagem :

- localização dos pontos de içamento;
- movimentos durante o içamento (rotação);
- posição dos apoios temporários;
- carregamento temporário.

No estudo de esforços em painéis é interessante chamar a atenção para o fato deste ser dimensionado para cargas de serviço que atuam fundamentalmente no seu plano médio –ou num plano paralelo a ele. O processo de pré-moldagem, entretanto, submete o painel a esforços bem diferentes dos previstos para as condições de serviço. A desfôrma e a movimentação de painéis de grandes dimensões certamente exigirá do painel uma maior resistência à flexão.

Os esforços decorrentes do processo de moldagem e transporte são modificados através de coeficientes (majoração ou minoração) para considerar efeitos dinâmicos.

3.2.1 AÇÃO DINÂMICA

A análise precisa de efeitos dinâmicos no processo de fabricação e montagem de painéis envolveria uma quantidade muito grande de variáveis que, nos casos usuais, não faria muito sentido em vista da grandeza das ações envolvidas. A avaliação da sucção na desfôrma de painéis, por exemplo, deveria ser feita com base na área de contato entre a peça e a fôrma.

Alguns valores para coeficientes de majoração são sugeridos pelo PCI Design Handbook (1992) e envolvem apenas o peso do painel. Esses valores são baseados em experiência anterior de fabricantes de painéis pré-moldados. Embora os valores sugeridos levem em conta apenas o peso da peça (o que leva a resultados satisfatórios para condições usuais), alguns casos particulares precisariam ser analisados com maior rigor.

TABELA 3 – Coeficientes de majoração de cargas estáticas para consideração de forças dinâmicas na desfôrma de painéis (PCI Design Handbook, 1992).

tipo de painel	acabamento com agregado exposto	acabamento liso (somente com uso de óleo)
plano sem relevos e juntas falsas com fôrma lateral removível	1,2	1,3
plano com relevos e/ou juntas falsas	1,3	1,4
tês e pequenas nervuras	1,4	1,6
esculpidos	1,5	1,7

Para considerar os esforços dinâmicos devido ao manuseio e montagem de painéis deve-se majorar o peso do painel em 20%. Para efeitos de transporte, o aumento deve ser de 50%.

Embora o dimensionamento do cimbramento não seja objeto de estudo deste trabalho, para o caso de edificações mais simples, o equipamento de suporte provisório não apresenta maiores complicações, devendo-se apenas fazer um estudo das fases de montagem para otimização do processo. Mesmo assim, para edificações simples, seria prudente considerarmos os coeficientes de segurança apresentados na Tabela 4 (PCI Design Handbook, 1992) , enquanto que, no projeto de edificações de maior porte e responsabilidade, todo um projeto precisaria ser feito.

TABELA 4 – Coeficientes de segurança para esforços temporários.

Equipamento de escoramento para cargas de vento	2
Dispositivos de escoramento moldados no painel	3
Equipamento reutilizado	5
Dispositivo para levantamento, manuseio e montagem	4

A norma NBR-9062 (1985) que trata de projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, considera que, quando não for possível uma análise dinâmica, deve-se adotar uma ação estática equivalente (g_e) calculada através do coeficiente de amplificação dinâmica (β_a) sobre a carga estática permanente (g):

$$g_e \geq g \cdot \beta_a \quad (1)$$

$\beta_a = 1,3$ para ações desfavoráveis no transporte

$\beta_a = 0,8$ para ações favoráveis

$\beta_a = 1,4$ para superfície de contato de fôrma maior que 50 m^2 ou em condições desfavoráveis na extração do painel da fôrma.

A norma NBR-9062 (1985) também considera um coeficiente de segurança igual a 4 para os dispositivos de levantamento, manuseio e montagem. A referida norma proíbe o uso de aços CA-50 e CA-60 nas alças de levantamento.

Nos elementos de levantamento, também deve-se efetuar a verificação à punção segundo a NBR-6118 (1982).

A posição do painel é talvez o fator mais importante a ser considerado no dimensionamento sob condições de projeto e, portanto, deve-se ao máximo procurar movimentar o painel na posição vertical (principalmente os painéis de grandes dimensões). Uma alternativa para reduzir os esforços temporários das condições de projeto seria trabalhar com fôrmas basculantes.

De posse do peso majorado do painel, os valores de momentos fletores a seguir definiriam os esforços a serem dimensionados na condição de projeto.

3.2.2 AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS

A posição dos pontos de içamento no painel determinará as condições para a análise estática. Embora nem sempre seja possível, seria interessante manter os mesmos pontos de içamento para desforma, transporte e montagem, com o painel sendo transportado na vertical.

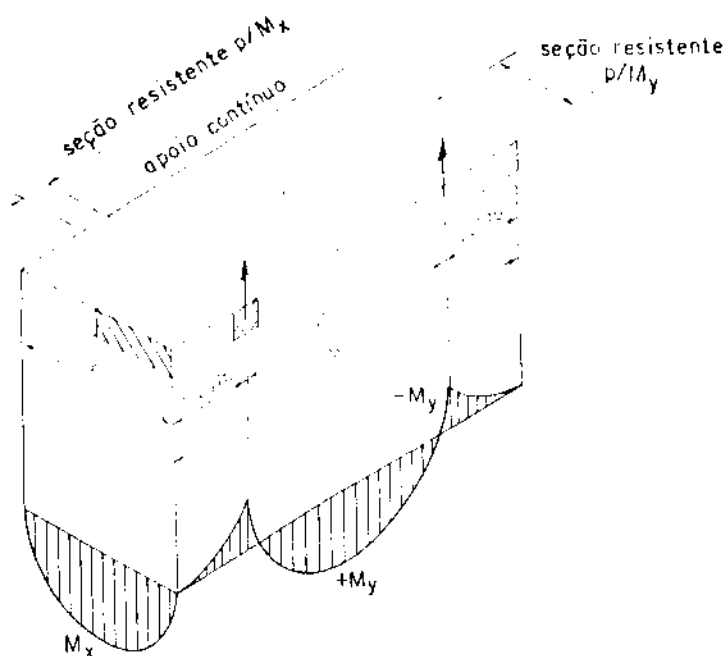
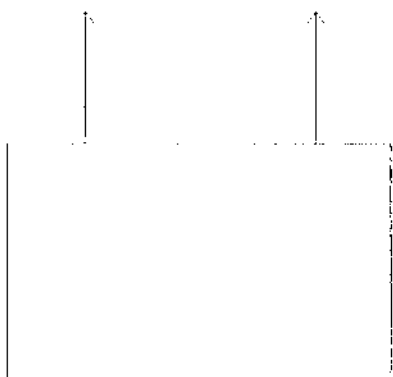
Os valores dos momentos desenvolvidos em painéis (de acordo com a quantidade e posição dos pontos de içamento) são obtidos diretamente da análise estática do painel. A seguir foram reproduzidos os casos mais usuais (PCI Design Handbook , 1992) ou talvez mais recomendados para minimizar os esforços.

Painéis cuja desforma se dá por suspensão em apenas uma das arestas :

Dois pontos :

$$M_x = \frac{g_c \cdot a^2}{8} \text{ por unidade de largura.}$$

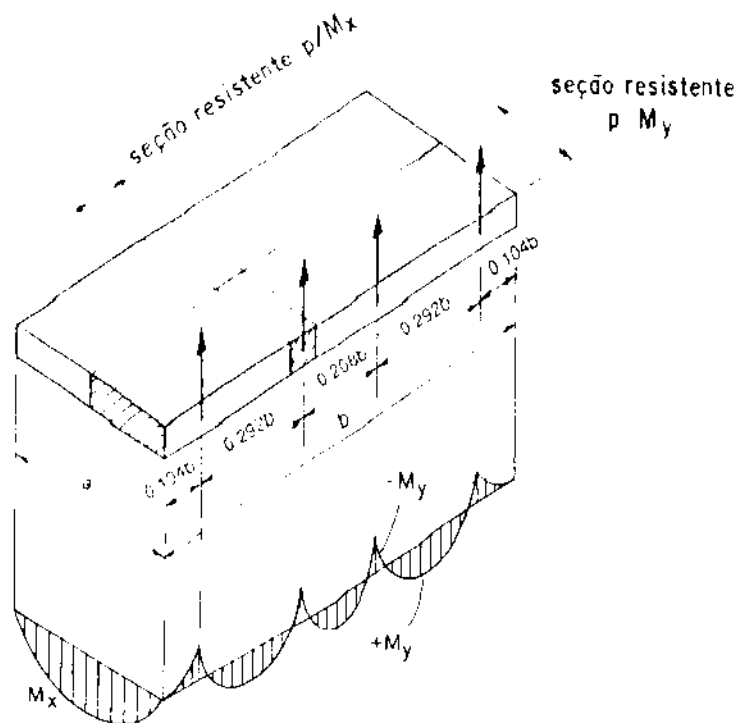
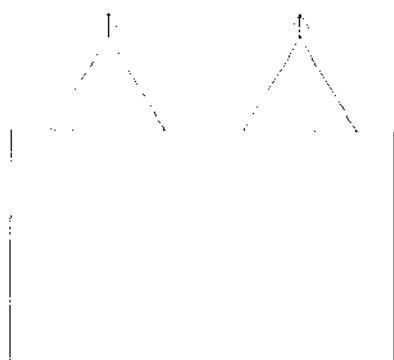
$$M_y = 0,0107 g_c \cdot a \cdot b^2 \text{ para a seção } \frac{a}{2}$$



Quatro pontos :

$$M_x = \frac{g_c \cdot a^2}{8} \text{ por unidade de largura}$$

$$M_y = 0,0027 g_c \cdot a \cdot b^2 \text{ para a seção } \frac{b}{2}$$



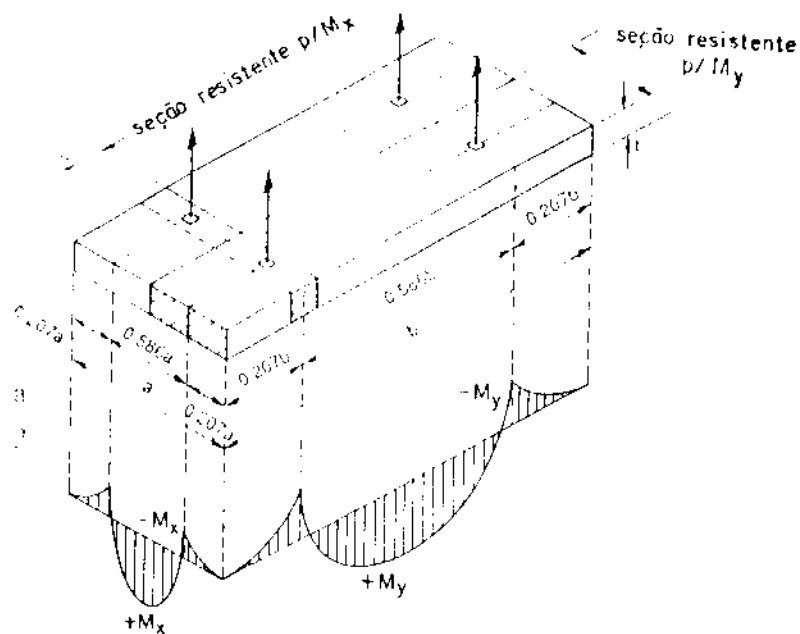
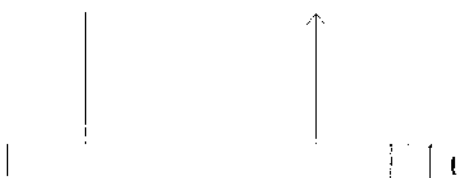
Painéis cuja desforma mantém a posição horizontal :

Duas linhas :

$$M_x = 0,0107 g_c \cdot a^2 \cdot b$$

$$\text{seção resistente} \leq \begin{cases} 15 t \\ \frac{b}{2} \end{cases}$$

$$M_y = 0,0107 g_c \cdot a \cdot b^2 \text{ para a seção } \frac{a}{2}$$

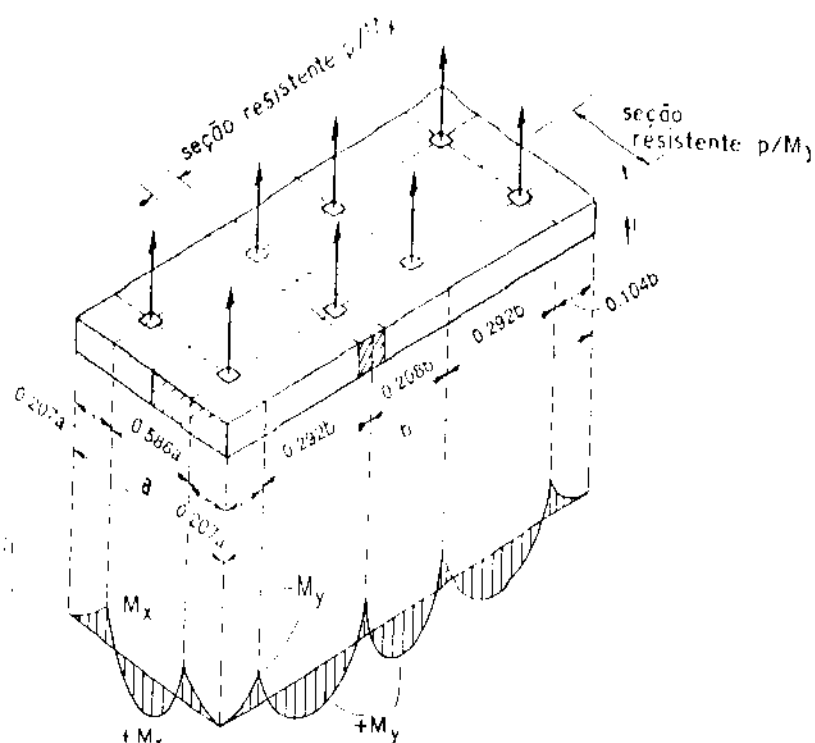


Quatro linhas :

$$M_x = 0,0054 g_c a^2 \cdot b$$

$$\text{seção resistente} \leq \begin{cases} 15 t \\ \frac{b}{4} \end{cases}$$

$$M_y = 0,0027 g_c a b^2 \text{ para a seção } a$$



3.3 CONDIÇÕES DE SERVIÇO

Como condições de serviço pretende-se avaliar as ações decorrentes da situação do painel em sua posição final na estrutura. Neste caso, tanto os painéis pré-moldados como os moldados no local, devem ser dimensionados segundo os critérios apresentados a seguir. Diversos fatores influem no comportamento do painel durante sua vida útil :

- função estrutural ou não-estrutural;
- comportamento composto ou não-composto;
- amplitude térmica a que está exposto o painel;
- retração das placas.

Segundo PFEIFER & HANSON (1965), a longo prazo, as condições ambientais podem oferecer consequências mais danosas ao comportamento estrutural de painéis sanduíche que as próprias cargas impostas à estrutura. A retração e a fluência, e principalmente a variação diária de temperatura (que tem efeito cíclico) introduzem esforços no painel.

Os esforços induzidos por variações de volume dependem do tipo de vinculação do painel e da composição entre as duas placas de concreto. No painel composto, os efeitos são mais pronunciados e observa-se uma tendência geral de flexão no sentido externo.

O painel composto possui maior rigidez lateral, mantendo-se a mesma espessura, que um painel não-composto. Entretanto, a composição entre as placas restringe a livre deformação da placa externa em relação à placa interna, provocando assim, a flexão do painel.

No painel não-composto –onde a placa estrutural na maioria das vezes está situada no lado interno– a placa não-estrutural é a única a sofrer um gradiente térmico. Devido à liberdade de movimentos existente entre as placas, não haverá flexão no painel pois a placa estrutural vinculada à estrutura possui um gradiente térmico desprezível. A literatura a respeito considera apenas a flexão térmica de painéis compostos.

Exceto nos casos em que ambientes internos possuam algum sistema de refrigeração ou calefação que provoque temperaturas diferenciadas em painéis internos, somente os painéis externos precisam ser analisados quanto ao efeito da flexão térmica; principalmente nas faces voltadas para o sol.

A retração diferenciada nas faces do painel sanduíche também pode causar flexão. A superfície externa do painel absorve umidade da atmosfera enquanto a superfície interna é relativamente seca. Assim, a retração no lado interno é maior que a do lado externo, e a tendência de flexão é no sentido externo. A quantificação da flexão devido à retração diferenciada não é muito precisa pois envolve mais variáveis que a flexão térmica. Pode-se estimar o efeito da retração considerando-a como uma variação de temperatura, utilizando-se dos parâmetros da NBR-7197 (1989).

A observação de que painéis sanduíche sempre fletem no sentido externo pode, a primeira vista, parecer equivocada para o caso de climas frios, onde a tendência natural de flexão térmica dos painéis seria no sentido interno. Entretanto, em climas frios, especialmente quando o ambiente interno é aquecido, a placa interna possui retração muito maior que a placa externa com tendência de flexão no sentido externo. Este fato possivelmente superaria a tendência de flexão no sentido interno, justificando assim, a tendência geral do painel em fletir no sentido externo (PCI Design Handbook, 1992).

3.3.1 CÁLCULO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES DEVIDO A VARIAÇÃO DE VOLUME

O cálculo de deformações e tensões em painéis sanduíche compostos submetidos a uma variação de volume pode ser feito por um processo apresentado por EINEA et al. (1991) baseado na teoria descrita por TRADOS et al. (1977). Este processo é bastante simples e abrange o cálculo de tensões e deformações em painéis sanduíche. Com ele, podemos estudar painéis com diversos tipos de gradientes térmicos através da espessura da placa.

Suposições de cálculo :

1. Seções planas permanecem planas após a flexão;
2. O material é considerado homogêneo com relação tensão-deformação constante;
3. A variação de temperatura se dá em regime permanente de transmissão de calor.

Passos do cálculo :

1. No caso de variação de temperatura, determinar o gradiente térmico (Capítulo 6) através da espessura do painel (Figura 25.a).
2. Sem considerar a composição entre as placas, permitir que cada uma deforme-se livremente. A deformação, ϵ_1 , é dada por : $\epsilon_1 = C \cdot \Delta T$ (Figura 25.a).

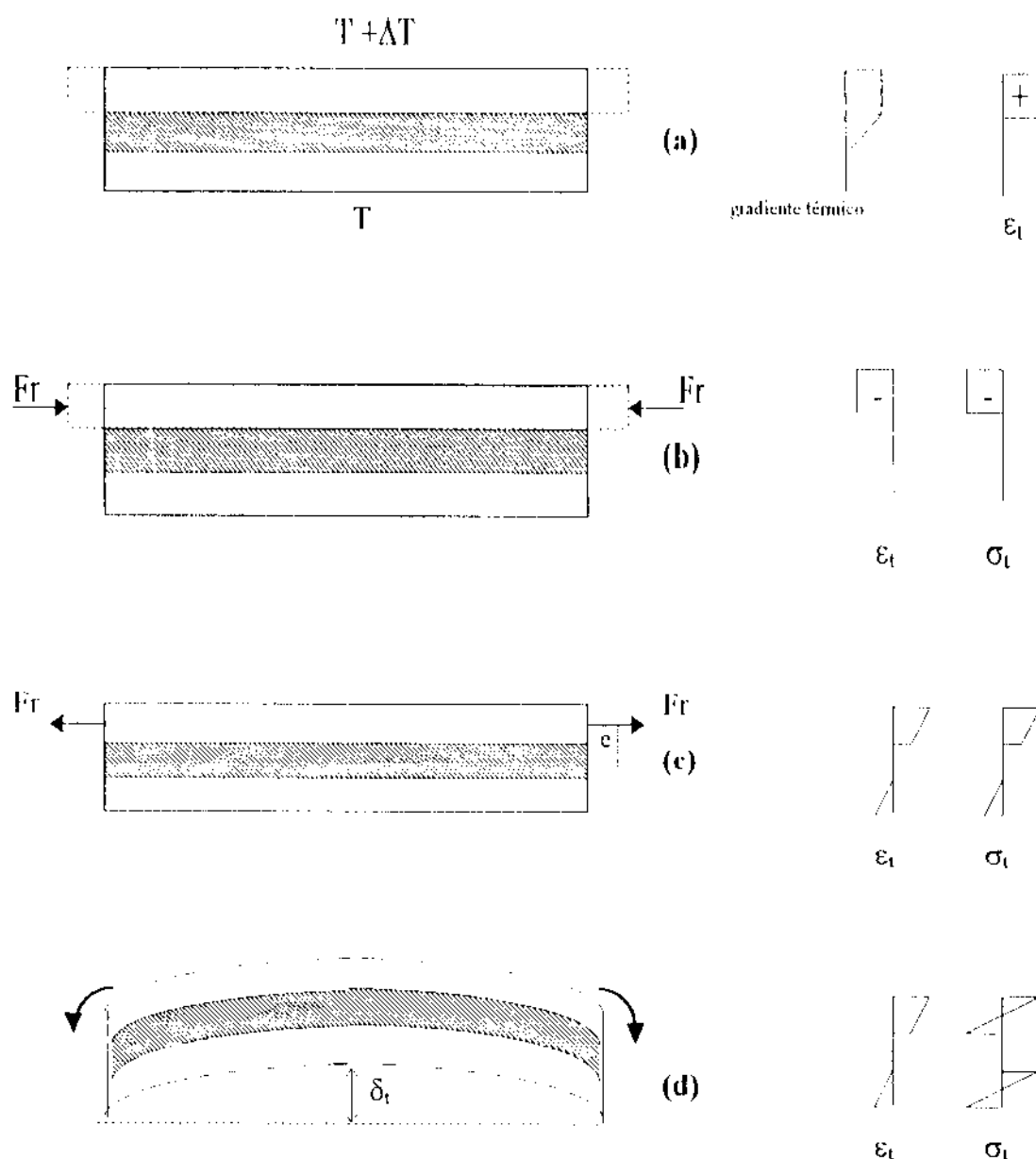


FIGURA 25 Passos do cálculo da tensão e deformação em painéis sanduiche compostos (EINEA et al., 1991).

3. Compensar a deformação ϵ_t com um par de forças opostas Fr . Tais forças devem produzir uma deformação de mesmo valor, com sinal trocado, da deformação térmica. A tensão ao longo do painel é dada por : $\sigma_l = -\epsilon_t.E_c$

O valor da força Fr é : $Fr = \sigma_l.b.t_1 = -(C.\Delta T).b.t_1.E_c$ (Figura 25.b)

4. Com a aplicação do par de forças Fr , a compatibilidade de deformações é recuperada. Entretanto, o equilíbrio é desfeito. Para equilibrar novamente o painel,

um par de forças com sinal trocado, $-Fr$, é aplicado. Um momento, $M = Fr.e$, restaura o equilíbrio estático (Figura 25.c).

5. Combinando-se os diagramas de tensão decorrentes de cada um dos passos anteriores resulta no diagrama final de tensões para o painel. O mesmo ocorre com as deformações (Figura 25.d).

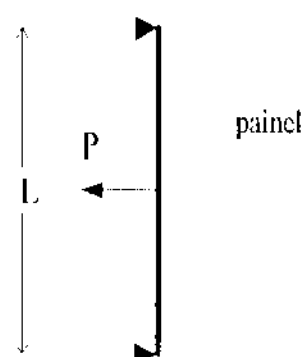
6. A deflexão térmica no meio do vão é dada por um sistema equivalente com momentos aplicados nas extremidades :

$$\delta_t = \frac{M.l^2}{8.E_c.I_c} = \frac{(C.\Delta T).b.l_l.c.l^2}{8.I_c}$$

OBSERVAÇÕES :

- Por simplificação, as expressões dos itens 1 a 6 referem-se a gradiente térmico constante ao longo da placa externa, o que para os casos usuais é bastante satisfatório. Se em algum caso for necessário uma análise mais refinada, deve-se corrigir o valor da tensão σ_t de acordo com a variação do gradiente térmico através da espessura da placa.
- Na maioria dos casos práticos, a composição total entre as placas não é assegurada. O estudo da flexão térmica desses tipos de painéis pode ser feita considerando-se o painel como estrutura plana deslocável. Aqui, é preciso conhecer o grau de composição que será representado no modelo de cálculo pela rigidez do elemento de ligação entre as placas.
- Para o valor de ΔT , segundo dados dos Estados Unidos, raramente encontram-se valores superiores a 23° C.

No caso de painéis com altura muito grande, pode ser interessante dispor de algumas ligações intermediárias para reduzir a flexão térmica no vão do painel. Em painéis que cobrem uma altura maior que um pavimento, deve-se fazer a ligação no piso intermediário. Para efeito de cálculo, na Figura 26 são apresentados os valores de forças necessárias para reduzir a flexão do painel. No trecho entre as conexões de reforço, deve-se analisar a flexão residual (PCI Design Handbook, 1992).

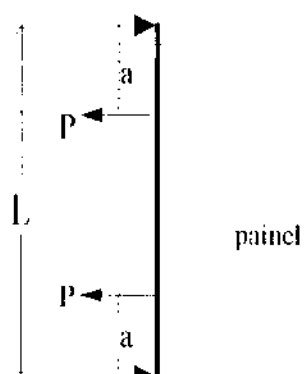


$$P = \frac{48 \cdot E_t \cdot I_c \cdot \delta_t}{L^3}$$

$$M = \frac{P \cdot L}{4}$$

M = momento no painel

P = força de restrição no meio do painel



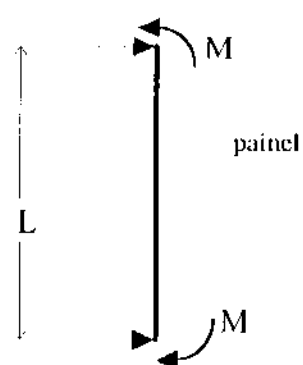
$$P = \frac{24 \cdot E_t \cdot I_c \cdot \delta_t}{3 \cdot a \cdot L^2 - 4 \cdot a^3}$$

$$M = P \cdot a$$

M = momento no painel

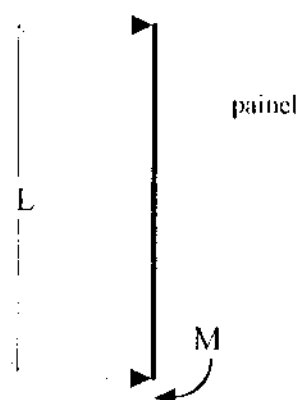
P = forças de restrição no meio do painel

FIGURA 26 Esforços decorrentes da restrição intermediária no painel.



$$M = \frac{8 \cdot E_t \cdot I_c \cdot \delta_t}{L^2}$$

M = momento de restrição no apoio



$$M = \frac{16 \cdot E_t \cdot I_c \cdot \delta_t}{L^2}$$

M = momento de restrição no apoio

FIGURA 27 – Esforços decorrentes de restrição nos apoios do painel.

$E_t = 0,75 E_c$ para variações diárias de temperatura.

$E_t = 0,50 E_c$ para variações de estações do ano.

3.4 MOMENTO DE INÉRCIA

Antes de apresentar a verificação no Estado Limite de Utilização, convém comentar sobre a diferença que existe entre o momento de inércia de painéis compostos e painéis não-compostos, considerando a seção bruta no Estádio I. O painel composto possui momento de inércia muito maior que o não-composto, portanto, é importante que no dimensionamento o momento de inércia seja avaliado corretamente. A aderência do isolante com as placas assegura que o momento de inércia de um painel sanduíche, em muitos casos, seja bem próximo do totalmente composto.

3.4.1 SEÇÃO DE FUNCIONAMENTO COMPOSTO

Para o caso mais comum de painel com duas placas de mesma espessura e considerando a homogeneização da seção quando a armadura é centrada :

$$I_c = \frac{1}{12} b \cdot (t^3 - t_1^3) + 2 \cdot (\alpha_e - 1) \cdot A_s \cdot d_1^2 \quad (2)$$

3.4.2 SEÇÃO DE FUNCIONAMENTO NÃO-COMPOSTO

No caso do painel com funcionamento não-composto, onde as placas possuem armadura centrada :

$$I_{nc} = \frac{1}{12} b \cdot (t_1^3 + t_2^3) \quad (3)$$

3.4.3 INÉRCIA EQUIVALENTE

O momento de inércia a ser considerado em painéis que possuem seção transversal variável (devido à algum tipo de abertura, por exemplo) pode ser

feito por aproximação utilizando um momento de inércia equivalente.

A largura resistente numa seção de painel qualquer submetido a carga concentrada deve ser o menor dos valores :

- distância de eixo a eixo entre as cargas;
- a área do painel efetivamente carregada acrescida de um trecho equivalente a seis vezes a espessura do painel distribuído para cada lado (Figura 28.a);
- 40% da altura efetiva do painel.

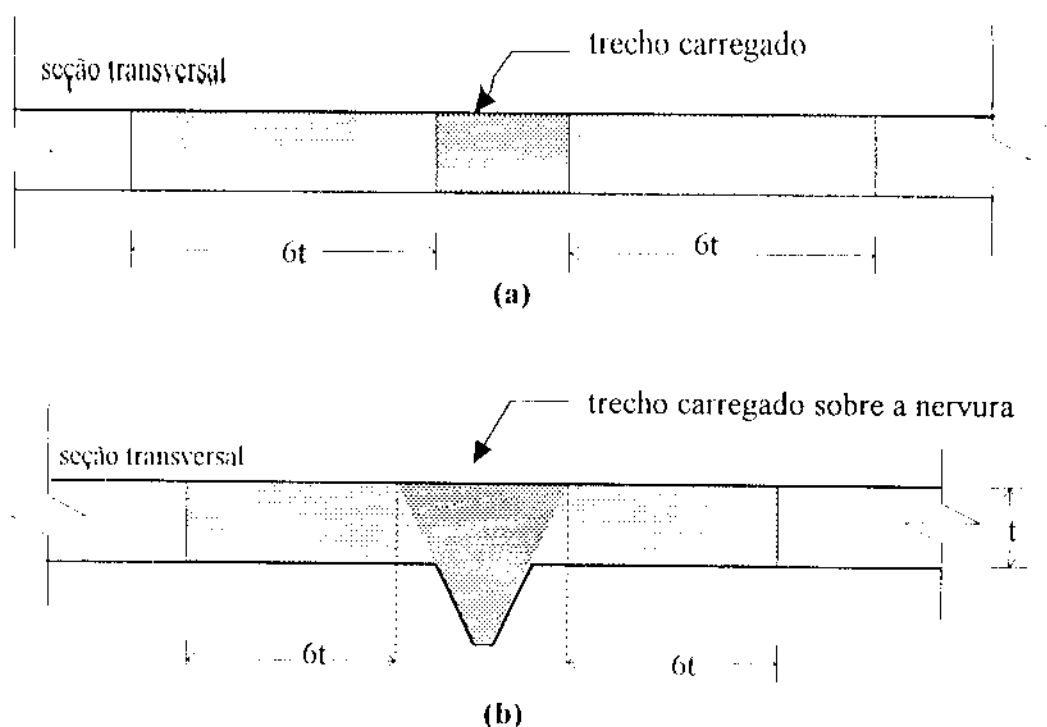


FIGURA 28 - Trecho resistente em painéis sujeitos a carga concentrada (PCI Design Handbook, 1992)

OBS. No casos de painéis com nervuras, considerar o prolongamento da largura resistente (igual a $6t$) a partir da base da nervura (Figura 28.b)

O momento de inércia equivalente pode ser feito da seguinte maneira :

1. Calcula-se o momento de inércia para cada trecho de seção constante ao longo de um eixo do painel.
2. Calcula-se a média desses valores ponderados pelo respectivo comprimento de trecho com seção constante.

3.5 ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO

A durabilidade do painel sanduíche está associada ao grau de proteção oferecido ao isolante por parte das placas de concreto que por sua vez depende de um cobrimento adequado para a armadura.

A flexão diferenciada entre painéis vizinhos pode provocar aberturas desagradáveis entre os painéis, além da ruptura da ligação. O controle de deformações torna-se essencial principalmente nos painéis submetidos a variações de temperatura. Deve-se utilizar as limitações usuais da Norma para peças de concreto armado.

3.5.1 MOMENTO DE FISSURAÇÃO (M_f)

NBR-6118 (1982) :

É o momento que ocorre em uma seção no limite entre o Estádio I e o Estádio II. É calculado segundo as hipóteses do Estado Limite de Formação de Fissuras. A seção sanduíche poderia ser considerada como seção retangular e de acordo com o anexo da NBR-6118 (1982), o momento de fissuração seria dado por :

$$M_f = 1,5 \cdot f_{tk} \cdot \frac{I}{y_{m\acute{a}x}} \quad (4)$$

ACI 318-89 (1989) :

O momento de fissuração é dado diretamente pela resistência a tração do concreto :

$$M_f = f_t \cdot \frac{I_g}{y_{m\acute{a}x}} \quad (5)$$

I e I_g = momento de inércia que depende do comportamento teórico previsto : composto ou não-composto.

A resistência do concreto à tração será determinada através de ensaios. Na falta de determinação experimental, poderão ser adotadas as seguintes relações :

$$f_{tk} = \frac{f_{ck}}{10} \text{ , para } f_{ck} \leq 18 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$f_{tk} = 0,06 f_{ck} + 0,7 \text{ , para } f_{ck} > 18 \text{ MPa} \quad (7)$$

Segundo o ACI-318-89 :

$$f_r = 0,623 \sqrt{f'_c} \text{ em MPa} \quad (8)$$

$$f'_c = f_{ck}$$

$$f_r = f_{tk}$$

O momento de fissuração em peças de argamassa armada apresenta redução significativa devido ao efeito da retração (BALLARIN & HANAI, 1994). A norma NBR-6118 (1982) recomenda que, em peças de concreto armado, a tensão de tração no concreto (f_{tk}) seja reduzida em 25% para considerar, ainda que de forma simplificada, o efeito da retração.

Nos ensaios realizados por BALLARIN & HANAI (1994), os resultados mostram que a tensão simplificada apresentada pela Norma resultava em valores 20% menores que os experimentais. Um modelo proposto apresentou variações de somente 2% .

Em peças com armadura centrada, a redução no momento de fissuração é :

$$\frac{Z \cdot h}{6} \quad (9)$$

$$\text{onde } Z = E_c \frac{(\epsilon_{cs} \alpha_e \rho)}{(1 + \alpha_e \rho)} A_c$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c}$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_c - A_s}$$

ϵ_{cs} é a deformação específica do concreto por retração. A norma NBR-7197 (1989) sobre projeto de estruturas de concreto protendido apresenta o cálculo de ϵ_{cs} considerando as diversas variáveis envolvidas no problema. A norma NBR-6118 (1982) permite que nos casos correntes, $\epsilon_{cs} = 15 \times 10^{-5}$.

3.5.2 ESTADO DE FISSURAÇÃO INACEITÁVEL

O item 4.2.2 da NBR-6118 (1982) estabelece um limite para a que a abertura de fissuras em peças de concreto armado não seja considerada nociva : Estado limite de fissuração inaceitável .

- 0,1 mm para peças não protegidas, em meio agressivo;
- 0,2 mm para peças não protegidas, em meio não agressivo;
- 0,3 mm para peças protegidas.

Ainda segundo a NBR-6118, a condição acima ocorre quando se verifica simultaneamente as seguintes desigualdades :

$$\frac{\phi}{2\eta_b - 0,75} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \left(\frac{4}{\rho_r} + 45 \right) > \begin{cases} 1 \text{ se } 0,1\text{mm} \\ 2 \text{ se } 0,2\text{mm} \\ 3 \text{ se } 0,3\text{mm} \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\phi}{2\eta_b - 0,75} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \frac{3\sigma_s}{f_{tk}} > \begin{cases} 1 \text{ se } 0,1\text{mm} \\ 2 \text{ se } 0,2\text{mm} \\ 3 \text{ se } 0,3\text{mm} \end{cases} \quad (11)$$

σ_s é a tensão na armadura sob solicitação, de acordo com o anexo da NBR-7197.

ϕ = diâmetro das barras (em mm)

$$\rho_r = \frac{A_s}{A_{ct}}$$

A_{ct} é a área do concreto de envolvimento, constituído por um retângulo cujos lados não distam mais que 7ϕ do contorno do elemento da armadura, conforme anexo da NBR-7197 (1989).

$$\eta_b > 1,8$$

Quando o cobrimento c da armadura longitudinal de tração for superior ao mínimo exigido, é permitido aumentar o valor limite da abertura das fissuras de até 50% proporcionalmente ao valor do quociente $\frac{c}{c_{\min}}$.

3.5.3 CONTROLE DE FISSURAS

Segundo a norma americana ACI 318-89 (1989), a abertura de fissuras deve ser limitada quando a tensão na armadura ultrapassar 275 MPa. A referida norma estabelece ainda dois critérios para o controle de fissuras :

Sem fissuras ou fissuras não perceptíveis;

Admitindo-se fissuras com aberturas controladas.

- Para o critério de fissuras não perceptíveis, a tensão de tração na flexão do concreto deve ser limitada ao módulo de ruptura corrigido por um coeficiente de segurança :

$$f'_t = \frac{0,623}{\gamma'_c} \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \quad \text{em MPa} \quad (12)$$

$$\gamma'_c = 1,5$$

$$\lambda = \begin{array}{ll} 1,0 & \text{para concreto normal} \\ 0,85 & \text{para concreto com agregado leve} \\ 0,75 & \text{para os demais concretos leves} \end{array}$$

- No critério de fissuras controladas, quando a tensão de tração no concreto ultrapassa o limite f'_t , recomenda-se dispor da armadura a seguir para manter as fissuras com aberturas limitadas :

$$A_s = \frac{M_k}{0,9 f_s \cdot d} \quad (13)$$

3.6 ESTADO LIMITE ÚLTIMO

A NBR-6118(1982) define o Estado Limite Último como aquele correspondente à ruína por ruptura, por deformação plástica excessiva ou por instabilidade. As hipóteses de cálculo a serem consideradas são as seguintes :

- a) As seções transversais permanecem planas.
- b) Para o encurtamento de ruptura do concreto, considera-se os seguintes valores :
 - seções não inteiramente comprimidas : $3,5 \text{ ‰}$;
 - seções inteiramente comprimidas : $3,5$ a 2 ‰ , mantendo-se inalterada e igual a 2 ‰ a deformação a $3/7$ da altura total da seção a partir da borda mais comprimida.
- c) O alongamento máximo permitido ao longo da armadura de tração vale 10 ‰ .
- d) A distribuição das tensões do concreto na seção se faz de acordo com o diagrama retangular simplificado permitido pela norma NBR-6118 (1982).
- e) A tensão na armadura é a correspondente à deformação determinada de acordo com as alíneas anteriores e obtida no diagrama tensão-deformação do aço.

A principal consideração a ser feita sobre o uso da teoria do concreto armado no cálculo de painéis sanduiche diz respeito à indeterminação do grau de composição entre as duas placas de concreto. Optou-se aqui por considerar inicialmente um grau de composição total entre as placas. Deste modo, o estudo da seção sanduiche é idêntico ao de uma seção usual de concreto armado, uma vez que o isolante não tem contribuição estrutural.

A partir das hipóteses apresentadas, será apresentado o cálculo da seção transversal de painéis sanduiche submetidos à flexão composta.

3.6.1 FLEXÃO COMPOSTA

Seja um painel sanduíche com duas placas de mesma espessura e armaduras idênticas e centradas em cada placa. Considerando que a seção possui comportamento totalmente composto, temos a seção de largura unitária esquematizada na Figura 29 :

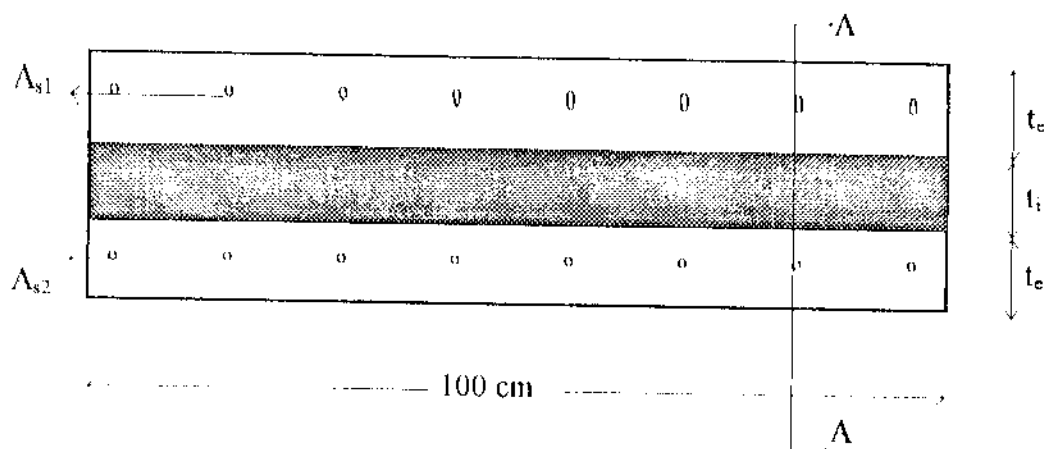


FIGURA 29 – Seção típica de painel sanduíche com largura unitária.

Para generalizar o dimensionamento com relação ao tipo de conector que será utilizado, vamos considerar como parte integrante e resistente da seção transversal do painel apenas as duas placas de concreto. O conector (seja nervura, treliça metálica ou elementos isolados) serve apenas de ligação entre as placas. O dimensionamento dos conectores é baseado no cisalhamento entre as placas oriundo da situação teórica de funcionamento completamente composto.

Ao se desprezar a contribuição da eventual área complementar de concreto no caso de nervuras de concreto, só estaremos trabalhando a favor da segurança nos casos em que a nervura for contínua e paralela à direção de flexão do painel. Ainda assim, é preciso que a linha neutra esteja fora da espessura da placa mais comprimida. No caso em que a nervura contribua efetivamente na resistência da seção, o acréscimo de área de concreto seria equivalente a um acréscimo na espessura

de cada placa não superior a 0,3 mm (assumindo nervuras espaçadas de aproximadamente 1 metro, como parece ser razoável para o tipo de painel em estudo).

Definindo os seguintes coeficientes adimensionais (SANTOS, 1983) :

$$\begin{aligned} v &= \frac{N_d}{\sigma_{cd} \cdot A_c} & \rho &= \frac{A_s}{A_c} & \beta_c &= \frac{t_c}{h} \\ \mu &= \frac{M_d}{\sigma_{cd} \cdot A_c \cdot h} & \beta &= \frac{A_{cc}}{A_c} & \beta_d &= \frac{d}{h} \\ \beta' &= \frac{A_{cc}}{A_c} \frac{Z_g}{h} & \beta_x &= \frac{x}{h} & \delta &= \frac{t_c}{2h} \end{aligned}$$

β e β' dependem então da posição da linha neutra .

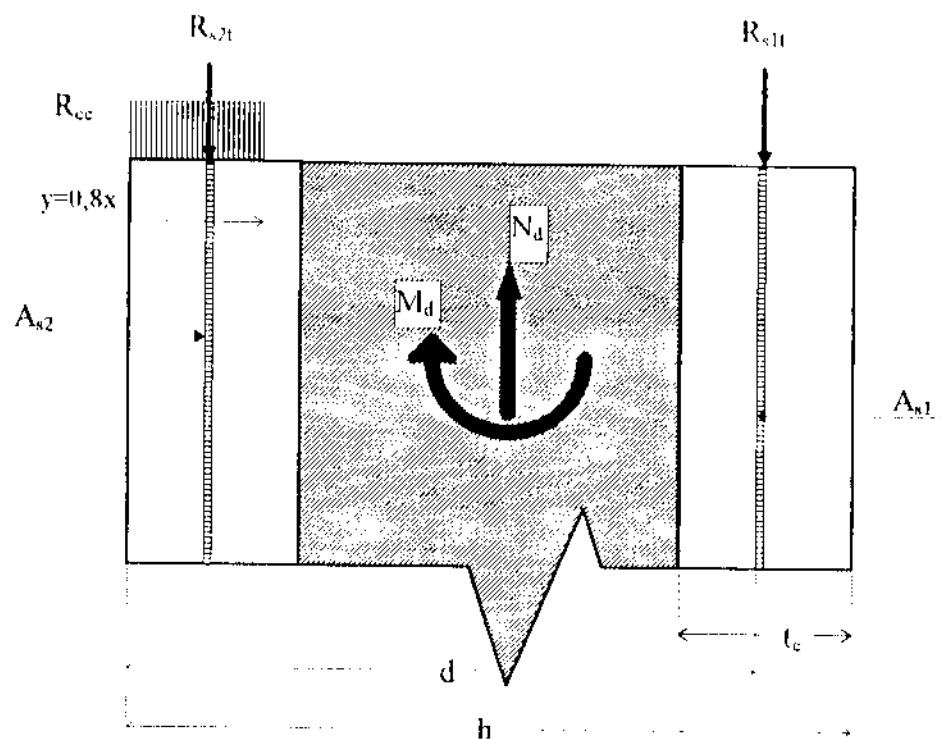


FIGURA 30 – Representação dos esforços no painel.

Seja a seção A-A da Figura 30, onde o índice 2 refere-se à borda mais comprimida :

Equilíbrio das forças normais :

$$N_d - \sigma_{cd} \cdot A_{cc} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1d} - A_{s2} \cdot \sigma_{s2d} = 0 \quad (15)$$

sendo $A_{s1} = A_{s2} = A_s$:

$$\frac{N_d}{\sigma_{cd} \cdot A_c} = \frac{\sigma_{cd} \cdot A_{cc}}{\sigma_{cd} \cdot A_c} + \frac{A_s}{A_c} \left(\frac{\sigma_{s1d}}{\sigma_{cd}} + \frac{\sigma_{s2d}}{\sigma_{cd}} \right)$$

$$v = \beta + \frac{\rho}{\sigma_{cd}} (\sigma_{s1d} + \sigma_{s2d}) \quad (16)$$

$$\rho = \frac{(v - \beta)}{(\sigma_{s1d} + \sigma_{s2d})} \sigma_{cd} \quad (17)$$

Equilíbrio de momentos na borda mais comprimida :

$$N_d \cdot \frac{h}{2} - M_d = (\sigma_{cd} \cdot A_{cc} \cdot Zg) + (A_s \cdot \sigma_{s2d} \cdot \frac{t_c}{2}) + (A_s \cdot \sigma_{s1d} \cdot d) \quad (18)$$

$$\frac{N_d}{\sigma_{cd} \cdot A_c} \cdot \frac{h}{2h} - \frac{M_d}{\sigma_{cd} \cdot A_c \cdot h} = \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{cd}} \frac{A_{cc}}{A_c} \frac{Zg}{h} \right) + \left(\frac{A_s}{A_c} \frac{\sigma_{s2d}}{\sigma_{cd}} \frac{t_c}{2h} \right) + \left(\frac{A_s}{A_c} \frac{\sigma_{s1d}}{\sigma_{cd}} \frac{d}{h} \right)$$

$$\frac{1}{2} v - \mu = \beta' + \frac{\rho}{\sigma_{cd}} (\sigma_{s2d} \cdot \delta + \sigma_{s1d} \cdot \beta_d) \quad (19)$$

utilizando a eq. (17) na eq. (19) :

$$\frac{1}{2} v - \mu = \beta' + (v - \beta) \cdot \left(\frac{\sigma_{s2d} \cdot \delta + \sigma_{s1d} \cdot \beta_d}{\sigma_{s1d} + \sigma_{s2d}} \right)$$

$$k \cdot \left(\frac{\sigma_{s2d} \cdot \delta + \sigma_{s1d} \cdot \beta_d}{\sigma_{s1d} + \sigma_{s2d}} \right) \rightarrow \frac{1}{2} v - \mu = \beta' + (v - \beta) \cdot k$$

$$\Omega = \beta' - k\beta$$

$$\mu = v(0.5 - k) - \Omega \quad (20)$$

Com as equações (16), (17), e (19), o problema está resolvido. Definindo uma determinada posição para a linha neutra, β e β' assumem valores fixos; k também é fixo, visto que depende dos valores de ϵ_{sid} . Os valores de σ_{sid} são determinados a partir de ϵ_{sid} de acordo com o tipo do aço utilizado. Com a equação (20), determinamos a reta (v, μ) de pontos com o mesmo β_x sobre a qual podemos marcar diversos valores para ρ e assim construir um diagrama de interação (v, μ) para a seção com os valores definidos para espessura da placa e isolante.

Equações de β e β' segundo a posição da linha neutra :

$$\beta = \frac{A_{cc}}{A_c} \qquad \beta' = \beta \cdot \frac{Z_g}{h}$$

$0 \leq \beta_x \leq 1,25 \beta_e$:	$1,25 \beta_e \leq \beta_x \leq 1,25(1-\beta_e)$:	$1,25(1-\beta_e) < \beta_x \leq 1,25$:
$\beta = \frac{0,4\beta_x}{\beta_e}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{0,8\beta_x + 2\beta_e - 1}{2\beta_e}$
$\beta' = \frac{0,16\beta_x^2}{\beta_e}$	$\beta' = \frac{\beta_e}{4}$	$\beta' = \frac{0,32\beta_x^2 + \beta_e - 0,5}{0,8\beta_x + 2\beta_e - 1}$

Equações de ϵ_{x1d} e ϵ_{x2d} segundo a posição da linha neutra :

$$\beta_x = \frac{x}{h} \qquad \beta_e = \frac{t_e}{h} \qquad \beta_d = \frac{d}{h}$$

convenção de sinais :

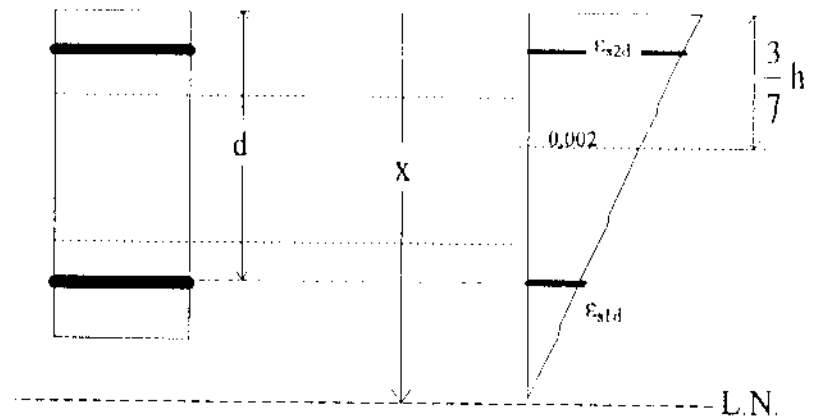
$\epsilon_{sid} > 0 \rightarrow$ compressão

$\epsilon_{sid} < 0 \rightarrow$ tração

$$\beta_x > 1,0 :$$

$$\epsilon_{s1d} = 14 \frac{\beta_x - \beta_d}{7\beta_x - 3}$$

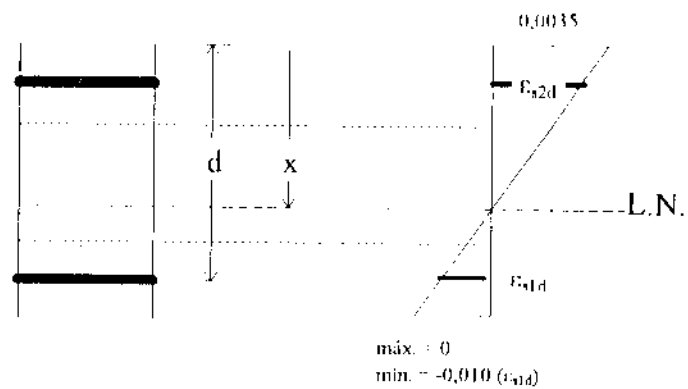
$$\epsilon_{s2d} = 14 \frac{\beta_x - \delta}{7\beta_x - 3}$$



$$\frac{3,5}{13,5} \beta_d < \beta_x < 1,0$$

$$\epsilon_{s1d} = 3,5 \frac{\beta_x - \beta_d}{\beta_x}$$

$$\epsilon_{s2d} = 3,5 \frac{\beta_x - \delta}{\beta_x}$$

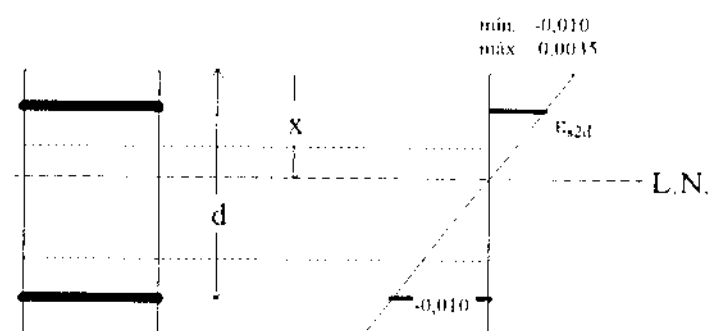


Observe que se $x < d$, ϵ_{s1d} torna-se negativo : tração

$$\beta_x < \frac{3,5}{13,5} \beta_d$$

$$\epsilon_{s1d} = -10 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{s2d} = 10 \frac{\beta_x - \delta}{\beta_d - \beta_x}$$



Observe que, enquanto $x > \delta$, ϵ_{s2d} é positivo (compressão).

Quando $x < \delta$, ambas as armaduras estão sob tração.

Com os valores de ϵ_{s1d} e ϵ_{s2d} , encontramos os valores σ_{s1d} e σ_{s2d} correspondentes de acordo com o aço utilizado.

AÇO TIPO A

$$0 \leq |\epsilon_{sd}| \leq |\epsilon_{yd}| \quad : \quad \sigma_{sd} = \epsilon_{sd} \cdot E_s$$

$$|\epsilon_{sd}| > |\epsilon_{yd}| \quad : \quad \sigma_{sd} = f_{yd}$$

$$\epsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$\epsilon_{sd} \leq 0,0035 \text{ devido ao concreto}$$

AÇO TIPO B

$$0 \leq |\epsilon_{sd}| \leq 0,7 \frac{|f_{yd}|}{E_s} \quad : \quad \sigma_{sd} = \epsilon_{sd} \cdot E_s$$

$$0,7 \frac{|f_{yd}|}{E_s} \leq |\epsilon_{sd}| \leq |\epsilon_{yd}| \quad : \quad \sigma_{sd} = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}$$

$$|\epsilon_{sd}| > |\epsilon_{yd}| \quad : \quad \sigma_{sd} = f_{yd}$$

$$\epsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} + 0,002$$

$$\epsilon_{sd} \leq 0,0035 \text{ devido ao concreto}$$

$$E_s = 20.000 \text{ kN / cm}^2$$

$$A = \frac{1}{45 \cdot f_{yd}^2}$$

$$B = \frac{1,4}{45 \cdot f_{yd}} - \frac{1}{E_s}$$

$$C = \frac{0,49}{45} - |\epsilon_{sd}|$$

Utilizando o conceito de zonas de solicitações proposto por SILVA JUNIOR. (1971), e apresentado por SANTOS (1983) para representar as zonas de solicitações possíveis numa peça de concreto com armaduras simétricas, podemos representar tais regiões em quatro conjuntos de pontos (v , μ) de acordo com a natureza do esforço nas barras :

- ZONA A : Compressão em todas as barras;
 ZONA C : Compressão em metade das barras e tração nas demais;
 ZONA E : Tração em todas as barras;
 ZONA O : Barras sem esforços.

Para o caso da seção sanduíche definida na Figura 29, os limites entre as zonas são :

LIMITE ZONAS A-C LIMITE ZONAS E-C LIMITE DA ZONA O

$x = d$	$x = \frac{t_c}{2}$	$\rho = 0$
$\epsilon_{s1d} = 0$	$\epsilon_{s2d} = 0$	$\nu = \beta$
$\beta_x = \frac{d}{h} = \beta_d$	$\beta_x = \frac{t_c}{2h} = \delta$	$\mu = 0.5 \beta - \beta'$

Nas páginas 84 e 85 encontram-se dois diagrama de interação que foram construídos para a seção sanduíche com $\beta_e = \frac{1}{3}$ (espessura da placa igual a do isolante) e $\beta_e = \frac{1}{4}$ (espessura do isolante igual a duas vezes a da placa) ambas para o aço CA-60 e f_{ck} genérico.

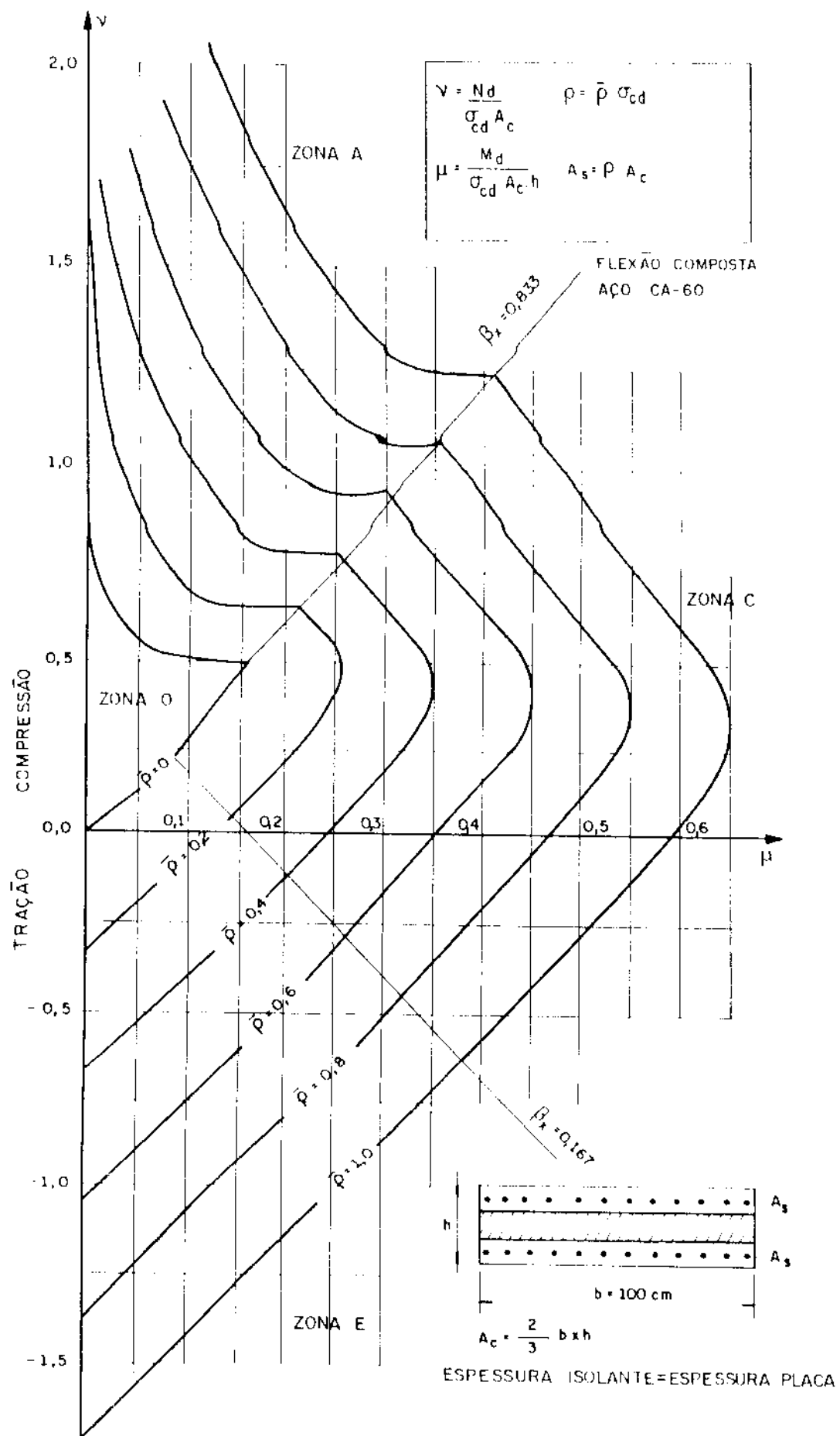
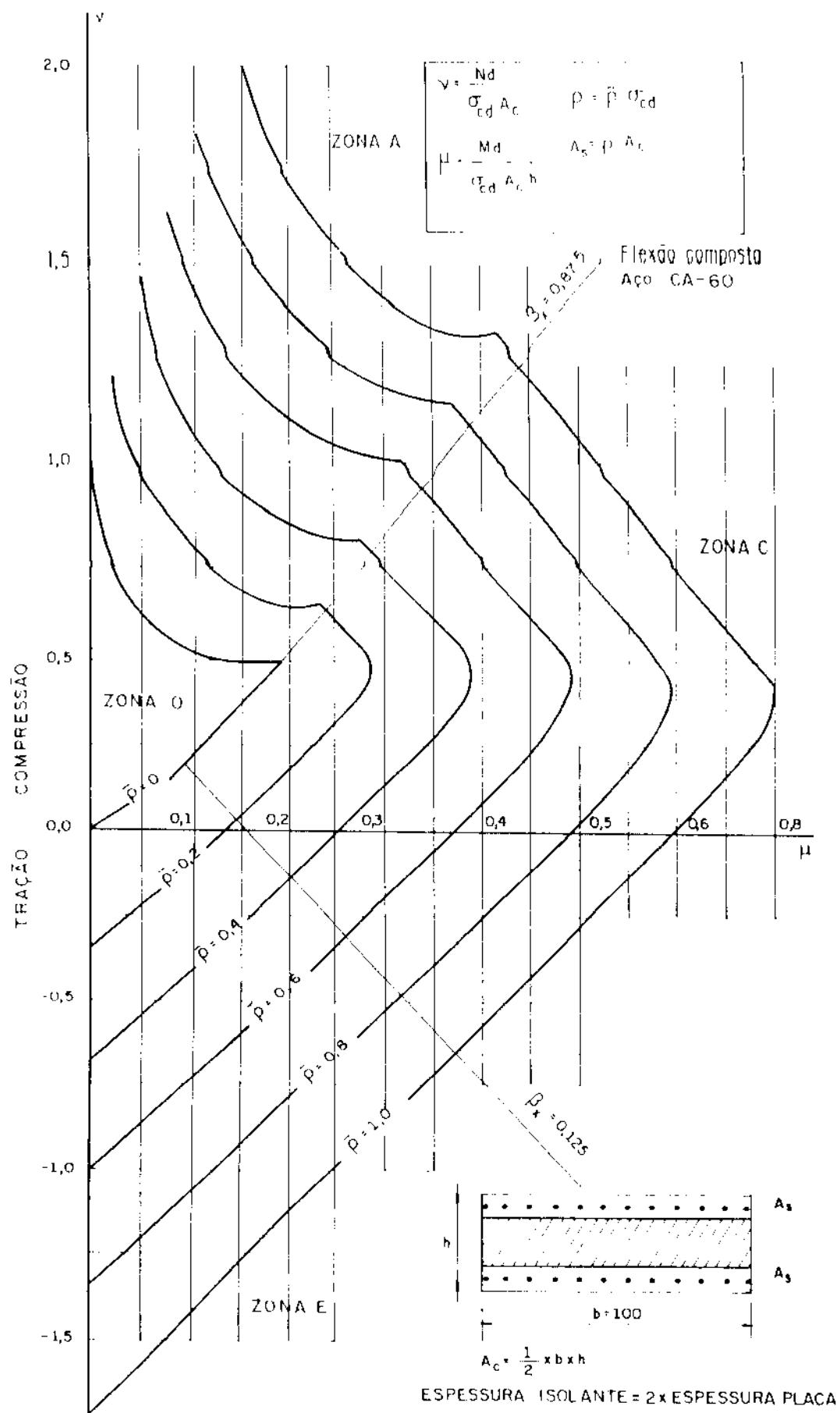


FIGURA 31 –Diagrama de interação para $\beta_c = 1/3$

FIGURA 32 –Diagrama de interação para $\beta_c = 1/4$

3.6.2 ESTUDO DA ESTABILIDADE

Segundo a NBR-9062 (1985), a estabilidade de estruturas constituídas de elementos pré-moldados deve ser verificada tanto para os elementos constituintes isolados como para o conjunto. Neste item, serão feitas algumas considerações a respeito da estabilidade do painel sanduíche como elemento isolado. O estudo do conjunto deve ser feito pelos métodos usuais de verificação.

A instabilidade decorre do fato de que na prática, a linha de ação da força axial não coincide exatamente com o plano médio do painel. Dependendo da esbelteza do painel, o efeito de segunda ordem pode levar a estrutura à ruína. Uma série de motivos proíbem a consideração da carga atuando no plano médio do painel. Dentre os diversos motivos, podemos citar :

- Flexão térmica do painel;
- Erros de fabricação e/ou montagem;
- Momento de engastamento nas extremidades do painel;
- Flexão devido à protensão;
- Cargas laterais;
- Imposições arquitetônicas.

Segundo a NBR-6118 (1982), A carga será sempre considerada excêntrica em relação ao plano médio da parede. A excentricidade a considerar será a soma das seguintes parcelas :

- excentricidade estrutural resultante da posição prevista para a carga;
- excentricidade acidental resultante de imprevisto na execução, variando de 1,5 a 2,5 cm de acordo com o cuidado na execução;
- excentricidade correspondente ao efeito de segunda ordem, considerada quando $\lambda > 40$.

3.6.2.1 Avaliação do índice de esbeltez de painéis sanduíche

Índice de esbeltez de um pilar é, por definição, a razão entre o comprimento de flambagem l_e e o raio de giração mínimo i : $\lambda = \frac{l_e}{i}$. Para painéis, devemos proceder de forma similar. Segundo a NBR-6118 (1982), o comprimento de flambagem para paredes fixadas no topo e no pé vale:

a) Dois lados livres: $l_e = l$ (Figura 33.a)

b) Um lado livre e outro fixo: $l_e = \frac{l}{1 + \left(\frac{\beta}{3}\right)^2} \geq 0,3 l$ (Figura 33.b)

c) Dois lados fixos: $l_e = \frac{l}{1 + \beta^2}$, se $\beta \leq 1$; $l_e = \frac{l}{2\beta}$, se $\beta \geq 1$ (Figura 33.c)

$$\beta = l/b$$

Se o topo e o pé da parede forem engastados e $\beta \leq 1$, os valores de l_e serão multiplicados por 0,85 (Figura 33.d).

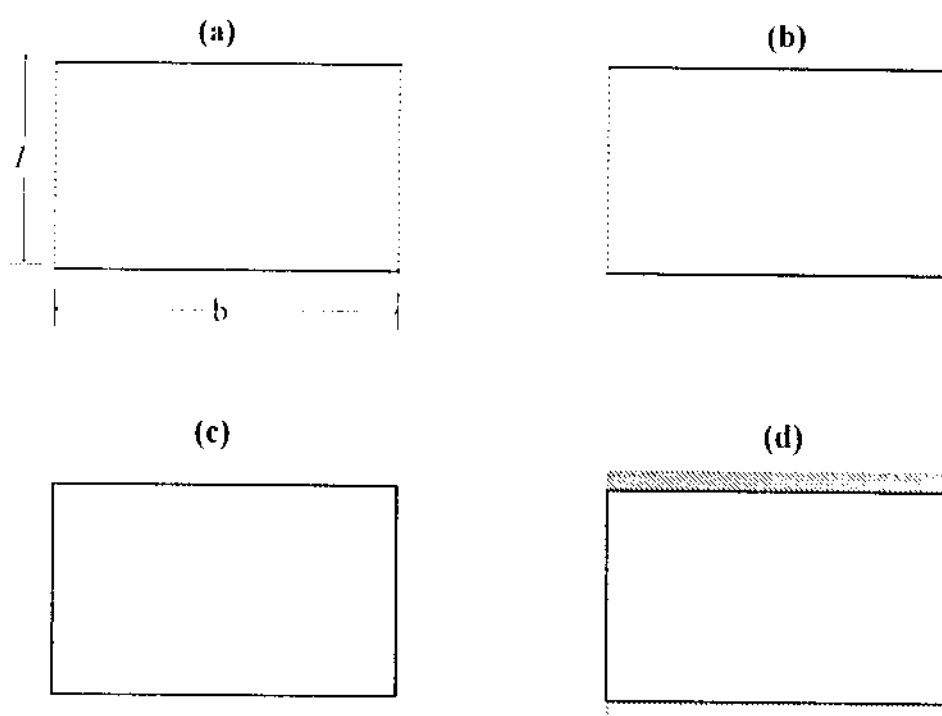


FIGURA 33 – Representação da vinculação dos painéis para avaliação de l_e .

Segundo a Norma, o cálculo da instabilidade de paredes fixadas no topo e no pé pode ser feito como para os pilares. Nesses, são considerados os seguintes intervalos para λ para análise do efeito de segunda ordem :

- $\lambda < 40$: pode-se desprezar os efeitos de segunda ordem.
- $40 < \lambda \leq 80$: considerar os efeitos de segunda ordem por processo simplificado.
- $80 < \lambda \leq 140$: considerar os efeitos de segunda ordem por processo exato.
- $140 < \lambda < 200$: considerar o momento de segunda ordem por processo exato, e considerar $\gamma_f = 1,4 + 0,01(\lambda - 140)$.

γ_f = coeficiente de segurança para o esforço normal de compressão.

Sendo o raio de giração definido como $\sqrt{\frac{I}{A}}$, o fato do painel ser uma estrutura contínua não altera o valor do raio de giração mínimo do painel que é função única da espessura das placas. Considerando –a título de ilustração– um painel com 280 cm de altura com placas de 4 cm de espessura e núcleo de isolante com 5 cm, algumas conclusões interessantes podem ser tiradas a respeito do índice de esbeltez .

Pelo resultado do índice de esbeltez dos painéis (60 para o painel composto e 243 para não-composto), não resta dúvida que o painel composto deve ser considerados como estrutura esbelta quando considerado como elemento isolado. O painel não-composto seria proibido por Norma.

O impedimento proporcionado pela vinculação lateral, entretanto, reduz substancialmente o comprimento de flambagem e por consequência o índice de esbeltez. Considerando ainda o painel do exemplo acima, se o mesmo estiver impedido nas laterais como no item 3.6.2.1.c , e comprimento igual à altura ($\beta=1$), o comprimento de flambagem é reduzido à metade.

3.6.2.2 Momento de segunda ordem (NBR-6118, 1982) (processo simplificado)

O momento de segunda ordem dado pela NBR-6118 (1982) é :

$$M_{2d} = F_d \cdot \frac{P^2}{10} \cdot \frac{1}{r} \quad (21)$$

em que a curvatura $1/r$ do eixo da peça será determinada por :

$$\frac{1}{r} = \frac{0,0035 + \frac{f_{yd}}{E_s}}{(v + 0,5)h} \quad \text{com } v + 0,5 \geq 1$$

onde

$$v = \frac{F_d}{A_c \cdot f_{cd}}$$

h = lado, paralelo à excentricidade acidental considerada, do retângulo circunscrito à seção.

$$F_d = N_d$$

3.6.2.3 Verificação do efeito de segunda ordem

Este processo permite a verificação da estabilidade de um painel sujeito a carga axial considerada fora do seu plano médio (PCI Design Handbook, 1992). Trata-se apenas de um processo de verificação dos elementos considerando-os isoladamente. A análise da estrutura como um todo é indispensável.

a) Sem contribuição da carga lateral :

$$P_u = 1,4 g + 1,7 q$$

$$P_o = 0,1 f'_c \cdot A_c$$

$$\beta_d = \frac{1,4g}{1,4g + 1,7q}$$

$$\phi = 0,7 \text{ para } P = P_o \Rightarrow \phi = 0,9 - 0,2 \left(\frac{P_u}{P_o} \right)$$

$$EI = \frac{\phi \cdot E_c \cdot I_g}{1 + \beta_d}$$

$$\phi = 0,9 \text{ para } P = 0$$

PROCESSO DE VERIFICAÇÃO :

1º PASSO – Considera-se, segundo as condições da estrutura, a excentricidade inicial mais a accidental para a carga axial P_u .

2º PASSO – Calcula-se a flecha no meio do vão devido ao momento da carga P_u pela excentricidade (inicial + accidental): $\delta_M = \frac{P_u \cdot e \cdot l^2}{16 \cdot EI}$

3º PASSO – Calcula-se a deflexão térmica no meio do painel, δ_T .

4º PASSO – A flecha de primeira ordem é : $\Delta_1 = \delta_T + \delta_M$.

5º PASSO – Calcula-se a flecha de segunda ordem no meio do vão devido a excentricidade Δ_1 . Este valor está em função da excentricidade (e) : $\Delta_2(e) = \frac{P_u \cdot e \cdot l^2}{8 \cdot EI}$.

6º PASSO – Processo iterativo :

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \Delta_2(e) \text{ para } e = \Delta_1 \\ \delta_2 &= \Delta_2(e) \text{ para } e = \Delta_1 + \delta_1 \\ \delta_3 &= \Delta_2(e) \text{ para } e = \Delta_1 + \delta_2 \\ &\vdots\end{aligned}$$

A convergência do resultado assegura a estabilidade do painel para a carga em questão

b) Com contribuição da carga lateral :

O processo que inclui o efeito do vento apresenta apenas algumas modificações em relação ao anterior :

Reduzir a carga axial P_u : $P_u = 0,75 \cdot (1,4g + 1,7q)$

Admitir $\beta_d = 0$ e $\phi = 0,9$

A flecha Δ_1 deve incluir a flecha devido à carga de vento : $\Delta_1 = \Delta_T + \Delta_M + \Delta_V$

sendo $\Delta_V = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot EI}$ com $q = 0,75 \times 1,7 \times \text{carga de vento}$

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata da análise dos resultados e conclusões apresentadas no relatório final dos ensaios realizados com os painéis sanduíche da empresa CABRINI MONOLITE Ind. e Com. Ltda. (HANAI & TAKEYA, 1994)⁷. Procurou-se também analisar o comportamento dos painéis sanduíche com base em outros ensaios realizados (BUSH & STINE, 1994 ; PFEIFER & HANSON, 1965). Esses resultados permitem uma melhor avaliação do comportamento dos painéis bem como um direcionamento e orientação para o planejamento de ensaios que possam vir a ser realizados em pesquisas futuras.

Outros estudos experimentais podem ser encontrados com mais detalhes na bibliografia de painéis sanduíche, entre eles apresentamos a seguir resumidamente o que foi avaliado em alguns deles.

BASUNBUL & AL-SULAIMANI (1991) realizaram ensaios de flexão com painéis nervurados que efetivamente apresentavam comportamento composto ou muito próximo disso. Na avaliação teórica a seção transversal dos painéis era considerada como uma seção usual de concreto armado

⁷ HANAI, J.B.; TAKEYA, T. Estudo do comportamento estrutural de painéis MONOLITE CABRINI na flexão simples. *Relatório final*, Laboratório de Estruturas, 1994.

CHANA & TURNER (1984) realizaram ensaios com cascas tipo sanduíche de dupla curvatura para embarcações. Esses elementos também poderiam ser utilizados em coberturas.

NANNI & CHANG (1986) estudaram painéis sanduíche submetidos à flexão simples e à compressão centrada. Os modelos obedeciam as características dos painéis destinados à fabricação de módulos residenciais propostos por CHANG & NANNI (1985). Os resultados mostraram-se satisfatórios com os painéis apresentando comportamento próximo ao composto.

LEE et al. (1986) realizaram ensaios com os painéis POLYWALL com o objetivo de melhorar o desempenho desses painéis e estender o seu uso para aplicações mais diversas. Os ensaios consistiam em :

1. Determinação da mistura mais apropriada para moldagem das placas;
2. Estudo do comportamento do painel na flexão simples utilizando-se configurações variadas de armadura e espessura de placa;
3. Estudo da retração nos painéis;
4. Estudo da durabilidade com ensaios de tempo acelerado.

4.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PAINÉIS MONOLITE/CABRINI NA FLEXÃO SIMPLES

4.2.1 OBJETIVO

Os ensaios realizados no Laboratório de Estruturas com os painéis da CABRINI MONOLITE Ind. e Com. Ltda. tinham como objetivo analisar o comportamento dos painéis quando submetidos a solicitações de flexão e

cisalhamento. Buscava-se quantificar a contribuição dos fios transversais de aço que serviam de conectores e ainda a contribuição da aderência entre as placas e o núcleo de poliestireno expandido.

4.2.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Foram executadas duas séries de modelos, com três exemplares cada, cuja única diferença de projeto foi a colocação de núcleo de poliestireno contínuo ou seccionado (disposto em duas camadas como na Figura 7.b do Capítulo 2, com a diferença que não haviam emendas).

Os pré-painéis (elementos constituídos de núcleo de poliestireno expandido associado a telas soldadas, conforme a Figura 34) foram fornecidos pela CABRINI Ltda. Esses pré-painéis foram cortados, para a execução dos modelos, com as dimensões de 300 x 56 cm (metade da largura padronizada).

As capas eram moldadas com argamassa armada e armadura constituída de fios longitudinais de 2,8 mm com espaçamento variável entre 50 e 100 mm, e fios transversais de 2,3 mm com espaçamento de 130 mm. Os fios que serviam de conector eram alinhados em três filas longitudinais com barras espaçadas a cada 130 mm.

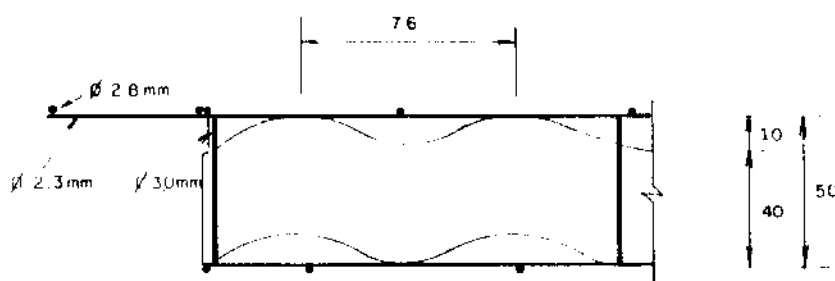


FIGURA 34 - Características gerais do pré-painel de poliestireno e telas.

4.2.3 MOLDAGEM DOS MODELOS

Os painéis foram moldados em piso nivelado com fôrmas de madeira em todo o contorno. Apesar de que na prática as placas são moldadas por jateamento de argamassa, neste ensaio a moldagem foi diferente para melhor analisar a resistência da argamassa das placas por meio de ensaios usuais com corpos-de-prova cilíndricos. A sequência de moldagem foi a seguinte :

- 1) colocação dos pré-painéis na fôrma de madeira;
- 2) argamassagem da face superior, vibrando-se a argamassa com vibrador de placa;
- 3) cura de pelo menos 24 horas da argamassa aplicada na primeira etapa;
- 4) reversão das peças para argamassagem da placa inferior;
- 5) argamassagem da outra placa;
- 6) cura do modelo durante pelo menos 7 dias.

As placas eram moldadas com argamassa contendo 0,1% (em volume) de fibras de polipropileno. A argamassa apresentou resistência à compressão na idade da realização dos ensaios entre 29,7 e 39,2 MPa, dependendo da placa e da série realizada.

Durante a argamassagem, observou-se que em razão do peso da argamassa aplicada em uma das faces, houve uma certa deformação do núcleo de poliestireno e dos fios conectores de aço, o que provocou um aumento da espessura de uma das camadas de argamassa, conforme se apresenta na Figura 35 e na Tabela 6.

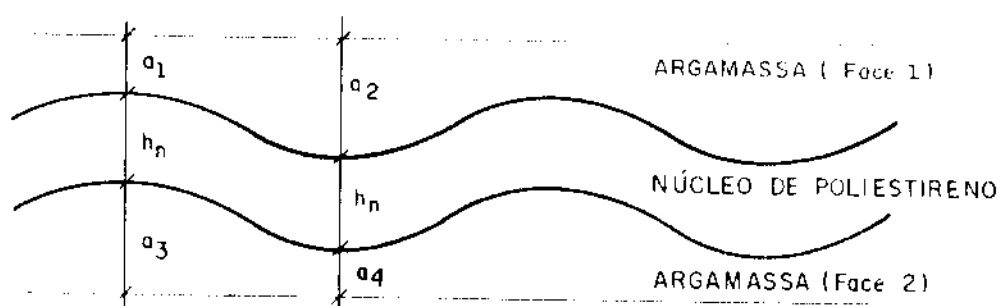


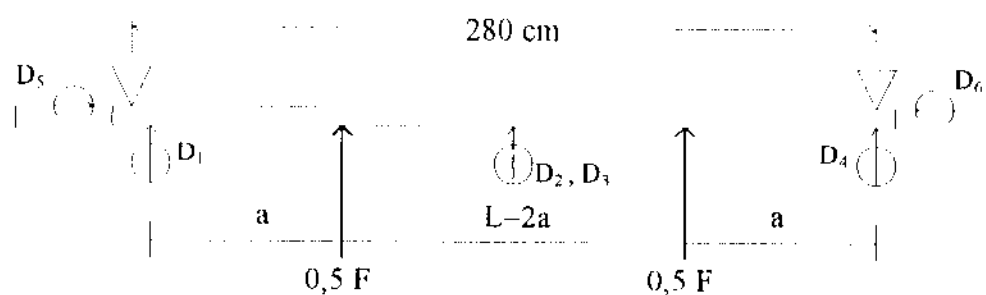
FIGURA 35 – Dimensões reais da seção transversal dos modelos.

TABELA 6 – Dimensões reais da seção transversal dos modelos (mm).

Painel	h	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	h _n
1	107	30	42	42	30	35
2	110	30	42	45	33	35
3	105	25	37	45	33	35
4	104	29	40	40	29	36
5	105	28	40	42	30	35
6	104	25	35	42	32	37

4.2.4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Os painéis foram ensaiados na Laje de Reação 1 do Laboratório de Estruturas, empregando-se os devidos pórticos de reação, aparelhos de apoio, macaco hidráulico e outros dispositivos para caracterizar um elemento simplesmente apoiado submetido a duas forças concentradas aplicadas de baixo para cima (Figura 36).

**FIGURA 36** – Esquema de carregamento e instrumentação dos modelos.

A distância “a” do ponto de aplicação de cada força ao apoio adjacente variou em cada exemplar ensaiado, para se obter resultados para diferentes valores de M/V (relação momento fletor/força cortante), uma vez que interessava particularmente observar o desempenho dos conectores ao cisalhamento. Portanto, os seguintes valores de “a” foram adotados :

- para os Painéis 1 e 5 : $a = 95$ cm
- para os Painéis 2 e 6 : $a = 70$ cm
- para os painéis 3 e 4 : $a = 120$ cm

A sequência de atividades na realização de cada ensaio foi a seguinte :

1. Aplicação de força por meio de macaco hidráulico no valor correspondente ao peso próprio do modelo e dos dispositivos de reação, de modo a praticamente eliminar solicitações iniciais devidas ao peso próprio;
2. A partir da situação anterior, considerada como etapa zero, são aplicadas as forças em incrementos de 250 a 500 N, conforme o painel e sua resistência final estimada;
3. Em cada etapa de carregamento são efetuadas medições de deslocamentos através dos defletômetros instalados conforme a Figura 36;
4. Em cada etapa de carregamento é feita uma inspeção visual da peça em ensaio, anotando-se a posição das fissuras eventualmente detectadas;
5. O ensaio prossegue até a ruptura do painel ou até a ocorrência de deformação excessiva.

4.2.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Apresentam-se a seguir as tabelas de resultados de ensaios de flexão nos painéis : valores da força cortante, momento fletor e deslocamentos medidos em cada etapa de carregamento nos ensaios de flexão dos painéis.

TABELA 7 – Resultado dos ensaios de flexão no painel 1 (M/V = 95 cm).

ETAPA	V (kN)	M (kN.cm)	flecha média (mm)	deslocamento relativo na extremidade (mm)
0	0	0	0	0
1	1,250	119	3,37	0,19
2	1,500	143	5,05	0,10
3	1,625	154	6,95	0,24
4	1,750	166	9,57	0,19
5	1,875	178	13,40	0,28
6	2,000	190	17,56	0,39
7	2,250	214	22,39	0,33
8	2,500	238	28,55	0,46
9	2,750	261	35,91	0,45
10	3,000	285	39,96	0,51
11	3,250	309	47,99	0,64
12	3,500	333	57,27	0,73
13	3,650	347	67,43	0,65
14	3,700	352	77,95	0,75
15	3,900	371		0,81
	0	0		0,09

TABELA 8 – Resultado dos ensaios de flexão no painel 2 (M/V = 70 cm).

ETAPA	V (kN)	M (kN.cm)	flecha média (mm)	deslocamento relativo na extremidade (mm)
0	0	0	0	0
1	0,25	18	0,69	0,06
2	0,50	35	1,42	0,10
3	0,75	53	2,26	0,14
4	1,00	70	3,09	0,19
5	1,25	88	3,95	0,23
6	1,50	105	4,90	0,27
7	1,75	123	5,80	0,26
8	2,00	140	10,08	0,43
9	2,25	158	11,63	0,50
10	2,50	175	16,12	0,59
11	2,75	193	19,10	0,78
12	3,00	210	21,16	0,89
13	3,25	228	23,57	1,01
14	3,50	245	32,92	1,15
15	3,75	263	35,85	1,27
16	4,00	280	40,34	1,51
17	4,25	298	47,39	1,71
18	4,50	315	57,68	2,04
19	4,75	333	65,91	2,28
20	5,00	350	77,41	2,92

TABELA 9 -- Resultado dos ensaios de flexão no painel 3 ($M/V = 120$ cm).

ETAPA	V (kN)	M (kN.cm)	flecha média (mm)	deslocamento relativo na extremidade (mm)
0	0	0	0	0
1	0,250	30	1,52	0,05
2	0,500	60	3,14	0,10
3	0,750	90	4,81	0,16
4	1,000	120	10,60	0,22
5	1,250	150	13,61	0,25
6	1,500	180	20,85	0,38
7	1,750	210	24,92	0,45
8	2,000	240	28,78	0,48
9	2,250	270	36,32	0,60
10	2,500	300	45,85	0,69
11	2,750	330	59,87	0,80
12	3,000	360	79,73	0,86
13	3,050	366	47,00	0,88
	0			0,24

TABELA 10 -- Resultado dos ensaios de flexão no painel 4 ($M/V = 120$ cm).

ETAPA	V (kN)	M (kN.cm)	flecha média (mm)	deslocamento relativo na extremidade (mm)
0	0	0	0	0
1	0,125	15	6,83	0,35
2	0,250	30	16,04	0,85
3	0,375	45	30,46	1,63
4	0,500	60	43,37	2,33
5	0,625	75	52,13	3,03
6	0,750	90	64,44	3,73
7	0,875	105	78,42	4,47
8	1,000	120	91,05	5,18
9	1,125	135	102,98	5,84
10	1,250	150	113,08	6,39
11	0,750	90	110,15	6,28
12	0,500	60	106,99	6,16
12	0,250	30	102,63	5,95
14	0	0		5,53

TABELA 11 – Resultado dos ensaios de flexão no painel 5 ($M/V = 95$ cm)

ETAPA	V (kN)	M (kN.cm)	flecha média (mm)	deslocamento relativo na extremidade (mm)
0	0	0	0	0
1	0,125	12	1,86	0,13
2	0,250	24	5,47	0,34
3	0,375	36	10,82	0,66
4	0,500	48	18,72	1,16
5	0,625	59	28,48	1,77
6	0,750	71	41,36	2,58
7	0,875	83	51,21	3,19
8	1,000	95	60,96	3,78
9	1,125	107	71,50	4,47
10	1,250	119	83,33	5,22
11	1,375	131	93,16	5,88
12	1,500	143	102,96	6,54
13	1,575	150	117,25	7,56
	1,000	95	113,66	7,39
	0,750	71	110,99	7,25
	0,500	48	107,57	7,06
	0,250	24	99,04	6,49
	0	0	83,57	5,47

TABELA 12 – Resultado dos ensaios de flexão no painel 6 ($M/V = 70$ cm)

ETAPA	V (kN)	M (kN.cm)	flecha média (mm)	deslocamento relativo na extremidade (mm)
0	0	0	0	0
1	0,125	9	1,96	0,13
2	0,250	18	3,79	0,24
3	0,375	26	5,02	0,32
4	0,500	35	6,90	0,44
5	0,625	44	9,39	0,61
6	0,750	53	15,31	1,03
7	0,875	61	22,31	1,63
8	1,000	70	27,62	2,05
9	1,125	79	33,33	2,52
10	1,250	88	41,10	3,12
11	1,375	96	48,03	3,67
12	1,500	105	57,39	4,61
13	1,625	114	65,73	5,20
14	1,750	123	74,63	5,81
15	1,875	131	81,44	6,34
	1,500	105	81,03	6,31
	1,250	88	79,60	6,22
	1,000	70	77,53	6,09
	0,750	53	74,19	5,85
	0,500	35	68,02	5,39
	0,250	18	59,46	4,75
	0	0	49,20	3,95

Nas figuras 37 a 42 apresentam-se os gráficos força cortante e momento fletor versus deslocamentos medidos : resultados dos ensaios de flexão dos painéis, indicando-se também as retas correspondentes à previsão teórica de flechas no Estádio I, para uma seção de viga de concreto, considerando-se painel com comportamento composto e não-composto.

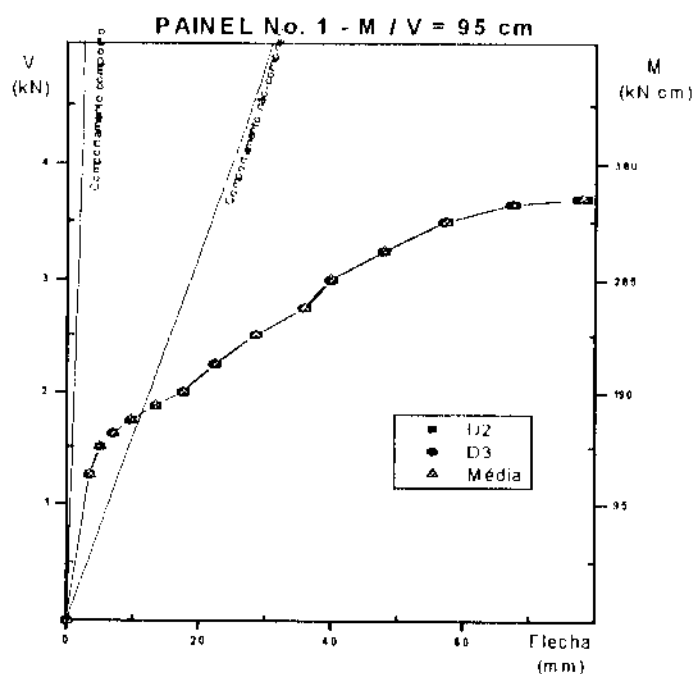


FIGURA 37 – Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (Painel 1)

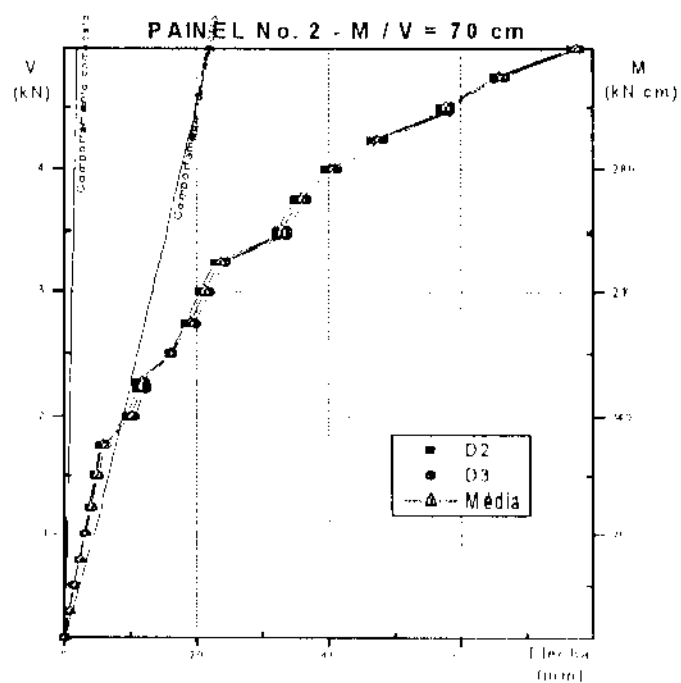


FIGURA 38 – Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (Painel 2)

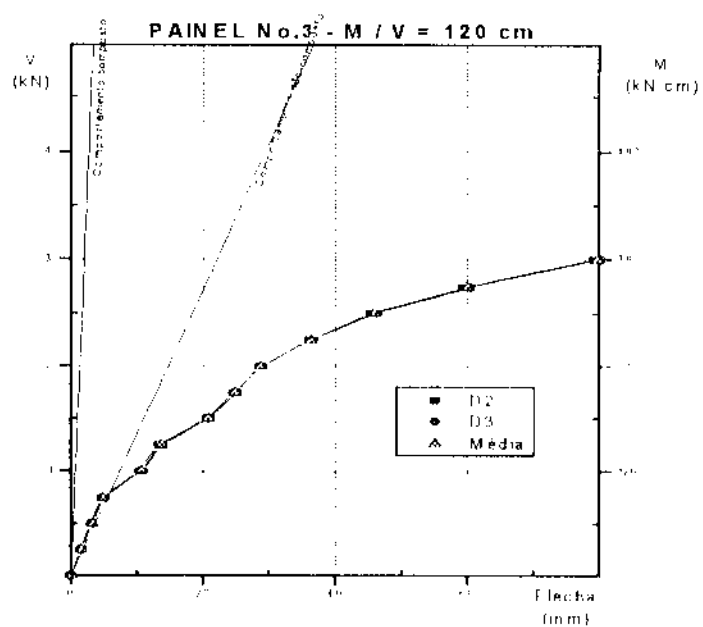


FIGURA 39 – Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (Painel 3)

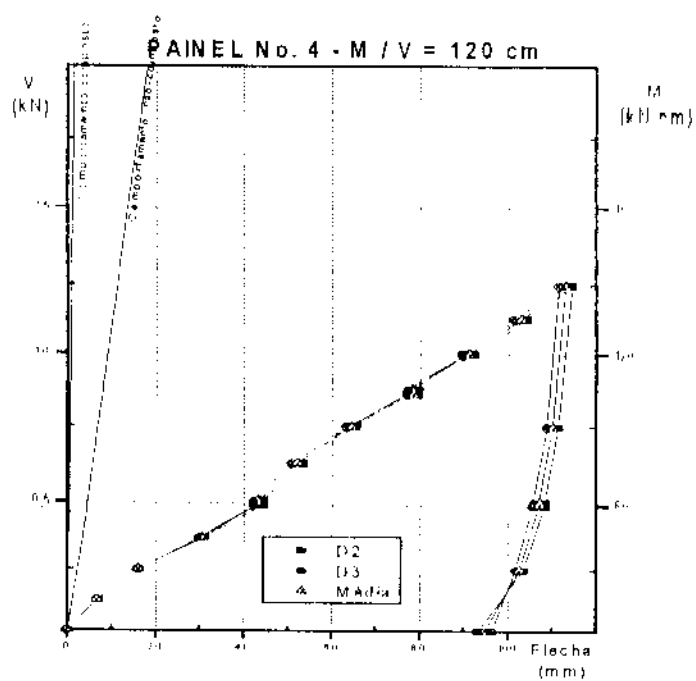


FIGURA 40 – Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (Painel 4)

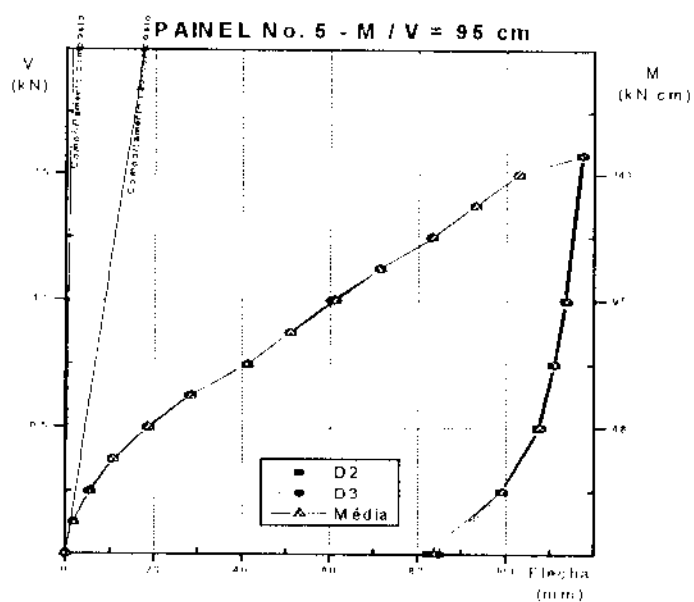


FIGURA 41 – Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (Painel 5)

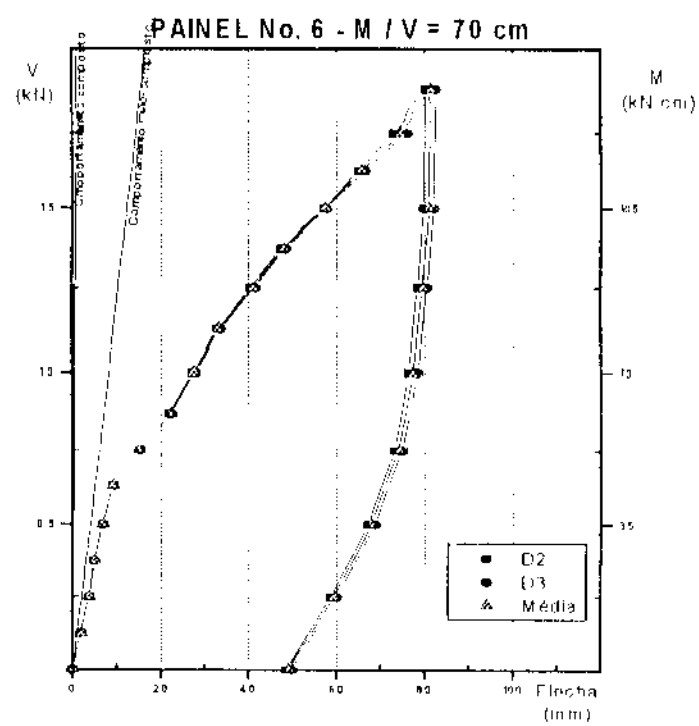


FIGURA 42 – Diagrama força cortante e momento fletor x deslocamento (Painel 6)



FIGURA 43 – Vista de um painel nos últimos estágios de carregamento.

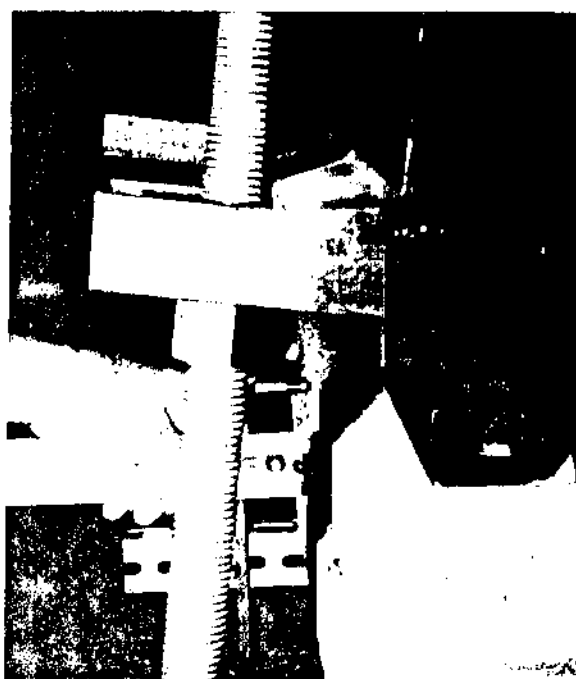


FIGURA 44 –Deslocamento relativo típico nos painéis 4, 5 e 6.



FIGURA 45 – Vista da seção do pré-painel.

4.2.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.2.6.1 Avaliação teórica

Apresenta-se neste item uma avaliação teórica da contribuição dada, ao efeito de comportamento conjunto das placas, pelos conectores de fios de aço e aderência do isolante com as placas. Para se chegar a uma primeira avaliação faz-se uma comparação dos resultados obtidos nos ensaios com valores teóricos correspondentes a duas situações de funcionamento do painel :

- a) painel de comportamento composto;
- b) painel de comportamento não-composto.

4.2.6.2 Análise do momento de fissuração (Estádio Ib)

Para uma análise comparativa da resistência no Estado Limite de Formação de Fissuras (formação da primeira fissura macroscópica), consideram-se os casos de comportamento composto e não-composto.

- a) Caso de comportamento composto : neste caso, utiliza-se o momento de inércia referente ao comportamento composto (conforme Capítulo 3), desprezando-se a contribuição da armadura :

$$M_r = 1,5 \cdot f_{tm} \cdot W_{x,comp} \quad (22)$$

- b) Caso de comportamento não-composto : na hipótese de placas independentes, o momento de fissuração da seção corresponde, aproximadamente, à soma dos momentos de fissuração de cada placa isolada. Deste modo, o momento de fissuração seria dado por :

$$M_r = 1,5 \cdot f_{tm} \cdot W_{x,neomp} \quad (23)$$

Na verdade, como as características mecânicas e a posição das armaduras de cada placa são diferentes entre si, os correspondentes momentos de fissuração também serão diferentes. Assim, uma placa fissurando antes da outra, possivelmente provocaria uma transferência de cargas e a fissuração, em seguida da outra placa.

Os valores do momento de inércia composto e não-composto variaram de painel a painel segundo suas dimensões (Tabela 6). Assim, para efeito de avaliação do momento de fissuração, considerou-se o momento de inércia de cada painel segundo suas dimensões exatas (Tabela 13), considerando-se inclusive a ondulação do pré-painel.

A resistência da argamassa (f_{tm}) foi considerada como 2,5 MPa (valor experimental médio da resistência à tração simples).

TABELA 13 – Características mecânicas dos painéis.

Painel	Comportamento composto		Comportamento não-composto	
	I_c (cm ⁴)	$W_{x,comp}$ (cm ³)	I_{nc} (cm ⁴)	$W_{x,ncomp}$ (cm ³)
1	5400	1000	452	217
2	5891	1080	509	236
3	4810	950	431	210
4	4850	930	384	194
5	5087	980	349	173
6	4860	960	297	154

Apresentam-se na Tabela 14 dados comparativos sobre o comportamento dos painéis no que se refere ao momento de fissuração. Os valores $M_{f,exp}$ correspondem ao estágio de carga em que se observou a formação da primeira fissura durante o ensaio, e correspondem nos gráficos momento fletor/flecha apresentados, ao estágio em que a curva se inclina acentuadamente à direita, indicando perda de rigidez do sistema de placas.

É importante salientar que os painéis 4,5 e 6 tiveram o núcleo de poliestireno seccionado, conforme apresentado no item 4.2.2. Assim, os painéis 4 e 5 não puderam ser avaliados porque eles, devido ao seccionamento dos núcleos de poliestireno, apresentaram funcionamento muito próximo do não-composto e conseqüentemente pequena resistência à fissuração. De fato, como os painéis apresentaram um peso próprio médio de $1,429 \text{ kN/m}^2$, durante o transporte e posicionamento para ensaio todos eles sofreram um momento fletor da ordem de 140 kN.cm, o que provocou fissuração prematura nos painéis 4 e 5. Possivelmente, os demais painéis passaram por solicitações um pouco menores e não chegaram a fissurar na preparação dos ensaios.

TABELA 14 – Relação entre momentos fletores de fissuração : $\frac{M_{t,exp.}}{M_{t,teorico}}$

Painel	$M_{t,exp.}(\text{kN.cm})$	comport. composto	comport. não-composto
1	142,5	0,38	3,19
2	140,0	0,35	3,39
3	120,0	0,34	3,59
4	*	*	*
5	*	*	*
6	52,5	0,15	0,91

* Os painéis 4 e 5 sofreram fissuração prematura.

4.2.6.3 Análise de flechas no Estádio I

Para efeito desta avaliação considera-se apenas o cálculo teórico no Estádio I, isto é, considera-se apenas a situação de argamassa não fissurada, em regime elástico-linear. Na Tabela 13 apresentam-se os valores calculados dos momentos de inércia e módulos de resistência das seções transversais dos painéis.

Admitindo-se comportamento elástico-linear e teoria de vigas, a flecha máxima no meio do vão é dada por :

$$\delta = \frac{V \cdot a^3 \left(3 \left(\frac{L}{a} \right)^2 - 4 \right)}{24 \cdot E \cdot I} \quad (24)$$

$I = I_c$ ou I_{nc} dependendo do caso.

Considerando-se as características mecânicas da seção transversal dos painéis (Tabela 13) e a eq.(24), determinam-se as correspondentes equações das retas carga/flecha para o caso de Estádio I (Tabela 15).

TABELA 15 – Equações carga/flecha (Estádio I).

Painel	a (cm)	comp. composto	comp. não-composto
1	95	$\delta = 5,20 \cdot 10^{-4} V$	$\delta = 62,1 \cdot 10^{-4} V$
2	70	$\delta = 3,80 \cdot 10^{-4} V$	$\delta = 44,0 \cdot 10^{-4} V$
3	120	$\delta = 6,57 \cdot 10^{-4} V$	$\delta = 73,4 \cdot 10^{-4} V$
4	120	$\delta = 7,13 \cdot 10^{-4} V$	$\delta = 90,0 \cdot 10^{-4} V$
5	95	$\delta = 6,03 \cdot 10^{-4} V$	$\delta = 87,9 \cdot 10^{-4} V$
6	70	$\delta = 5,04 \cdot 10^{-4} V$	$\delta = 82,4 \cdot 10^{-4} V$

Observações :

Unidades : δ em mm e V em N

Para os painéis 1,2 e 3 $E_c = 28084$ MPa (média experimental)

Para os painéis 4,5 e 6 $E_c = 25688$ MPa (média experimental)

Observando-se os gráficos carga x flecha, a análise de flechas mostra que :

- Para os painéis 1,2 e 3, enquanto estes não se encontram fissurados, as flechas situam-se entre aqueles valores teóricos calculados no Estádio I para comportamento composto e não-composto, com alguma tendência a se aproximar dos valores teóricos correspondentes ao comportamento não-composto.
- Os painéis 4,5 e 6 mostraram-se muito mais deformáveis, com flechas maiores que as teoricamente previstas para comportamento não-composto.

4.2.6.4 Análise da resistência no Estádio III

Para uma análise comparativa das resistências no Estado Limite Último, é apresentada uma avaliação da resistência à ruptura (flexão simples) dos painéis, para os casos de comportamento composto e não-composto. Por simplicidade, admitem-se os seguintes dados e simplificações :

- Admitindo-se as dimensões nominais da seção transversal (Figura 34).
- Resistência da argamassa : $f_{cm} = 35$ MPa (valor médio dos ensaios de compressão).
- Resistência do aço : $f_{yk} = 600$ MPa (valor nominal do aço CA-60).
- Despreza-se a contribuição da armadura comprimida

a) Caso de comportamento composto : o momento fletor resistente da seção pode ser obtido aplicando-se as equações de equilíbrio e compatibilidades de deformações, tomando-se :

$b = 56$ cm (largura da seção)

$d = 7,5$ cm (altura útil da seção)

$A_s = 0,493$ cm² (8 fios de 2,8 mm)

A partir dessas hipóteses, resulta o valor do momento resistente último : $M_u \approx 220$ kN.cm, caracterizando o caso de deformação típica de domínio 2. Observa-se que este valor estimativo resultou menor que o valor do momento de fissuração correspondente, indicando, a princípio, que logo após à formação da primeira fissura poderia haver escoamento da armadura.

b) Caso de comportamento não-composto : o momento fletor resistente corresponderia à soma dos momentos fletores resistentes de cada placa isolada. Nesta situação, uma das placas fica com resistência praticamente nula, pois a altura útil da seção é muito pequena. Assim adotamos os seguintes valores :

$b = 56$ cm (largura da seção)

$d = 2,5$ cm (altura útil da seção)

$A_s = 0,493$ cm² (8 fios de 2,8 mm)

A partir dessas hipóteses, resulta o valor do momento resistente último : $M_u \cong 71,7$ kN.cm, caracterizando o caso de deformação típica de domínio 2.

Apresentam-se na Tabela 16 dados comparativos sobre a resistência no Estado Limite Último dos painéis. Os valores $M_{u,exp.}$ correspondem à maior carga que se conseguiu aplicar nos modelos, sendo que em todos os ensaios o carregamento foi interrompido devido à deformação excessiva dos painéis e final do curso do macaco hidráulico de aplicação de cargas, não havendo sinais claros de escoamento da armadura ou esmagamento da argamassa.

TABELA 16 – Comparação dos momentos resistentes últimos $\frac{M_{u,exp.}}{M_{u,teo.}}$

Painel	$M_{u,exp.}$ (kN.cm)	comport. composto	comport. não-composto
1	371	1,69	5,17
2	350	1,59	4,88
03	366	1,66	5,10
4	150	0,68	2,09
5	150	0,68	2,09
6	131	0,60	1,83

Observa-se agora um aspecto importante, que é o fato de que os valores experimentais (no caso de painéis com núcleo contínuo) mostram-se bem mais altos que os teóricos. Entretanto, deve-se salientar que :

- Os valores teóricos foram calculados com dimensões nominais, sendo que os painéis ensaiados possuíam dimensões das placas um pouco maiores.
- No cálculo teórico, utilizou-se a resistência característica de escoamento nominal do aço CA-60, quando costumeiramente a resistência é maior, chegando-se a obter resistências de ruptura de até 900 MPa.
- No cálculo teórico foram desprezadas contribuições de armaduras mais próximas da zona comprimida.

4.2.7 CONCLUSÕES

- Os painéis com núcleo integro apresentaram resistência à fissuração maior do que aqueles com núcleo seccionado, mostrando que de fato o núcleo de poliestireno promove uma boa contribuição na composição do painel.
- Os conectores utilizados (fios transversais) possuem geometria de conectores flexíveis (conforme definido no Capítulo 2), e portanto não oferecem contribuição significativa ao cisalhamento, como mostraram os resultados dos ensaios.
- O grau de composição com relação ao momento de fissuração obtido (cerca de 35%) provavelmente reflete somente a aderência do isolante com o núcleo, uma vez que os conectores não oferecem resistência ao cisalhamento.
- O cálculo teórico do momento resistente dos painéis considerando comportamento composto oferece uma estimativa segura do momento resistente de painéis com núcleo contínuo, no que se refere à capacidade de carga (desconsiderando-se a questão da deformação excessiva).
- O cálculo teórico do momento resistente dos painéis considerando comportamento não-composto oferece uma estimativa segura do momento resistente de painéis com núcleo seccionado, no que se refere à capacidade de carga (desconsiderando-se também a questão de deformação excessiva).
- O posicionamento da armadura (colada ao núcleo) impede um melhor aproveitamento estrutural do painel, como foi mostrado no fato do momento último ser menor que o momento de fissuração.

4.3 ESTUDO DO COMPORTAMENTO NA FLEXÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHE COM CONECTORES RÍGIDOS DE TRELIÇA CONTÍNUA

4.3.1 OBJETIVO

Os modelos realizados por BUSH & STINE (1994) tinham como objetivo contribuir na avaliação da composição entre as placas de concreto nos painéis sanduíche com conectores rígidos de treliça metálica contínua.

Procurou-se avaliar também os esforços que seriam resistidos pelos conectores e pela aderência da placa com o isolante. A distribuição do cisalhamento entre esses elementos é complexa e pode ser alterada com o tempo.

4.3.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

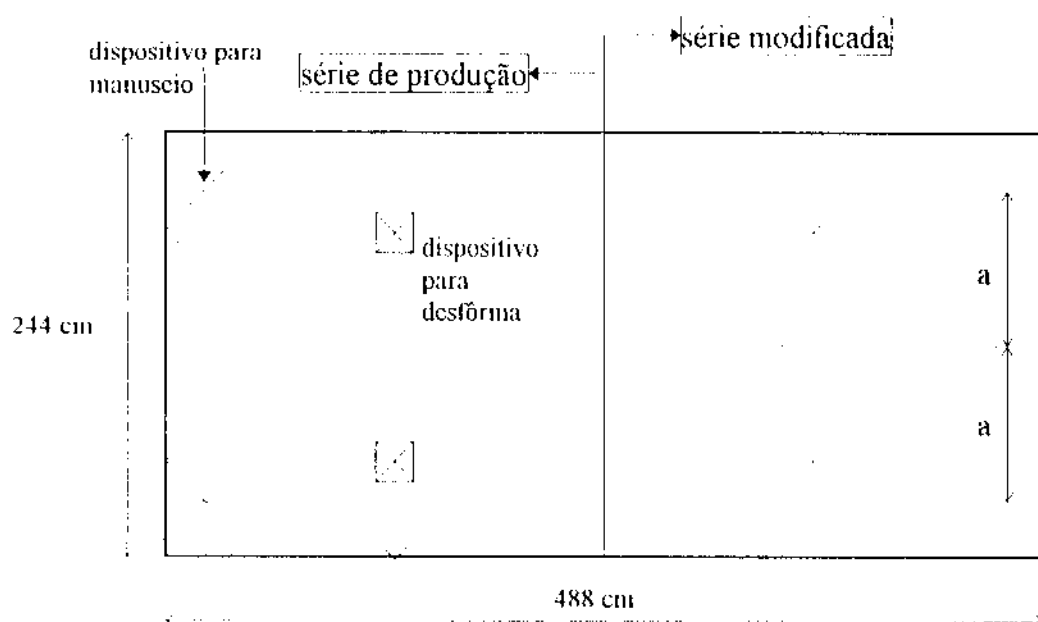
Foram realizadas duas séries com painéis sanduíche. Uma primeira série avaliou painéis produzidos segundo os critérios adotados na fábrica e utilizados em painéis disponíveis comercialmente. A segunda série estudou painéis que incorporavam modificações para melhor avaliar a transferência do cisalhamento entre placas, eliminando qualquer forma desconhecida de transferência do cisalhamento.

Cada série era constituída de três modelos com disposição variada de conectores (Tabela 17). O nome do modelo tinha o formato **S-BN**, onde :
S indicava a série de ensaios : painéis **M**odificados ou de **P**rodução;
B indicava o comportamento estrutural previsto : **C**omposto ou **N**ão-Composto;
N indicava a quantidade e direção dos conectores rígidos de treliça metálica.

Os modelos tinham 244 x 488 cm (Figura 46) com duas placas de 76,2 mm e isolante de poliestireno expandido com 50,8 mm de espessura. A treliça metálica utilizada como conector era disponível comercialmente (Figura 47).

TABELA 17 – Detalhes dos modelos ensaiados por BUSH & STINE (1994)

Painel	número de treliças	espaçamento (a) entre treliças (Figura 46)	comentários
P-CF3	3	91,5 cm	sem armadura de telas soldadas
P-CF4	4	61,0	–
P-NCF	0	–	uso de conectores flexíveis
M-CF2	2	122 cm	–
M-CF3	3	91,5 cm	–
M-CFT	5	91,5 ou 122 cm	treliças dispostas na transversal

**FIGURA 46** – Geometria dos painéis ensaiados por BUSH & STINE (1994)

Para cada série de ensaios foram moldados modelos para analisar o comportamento dos conectores através de modelos tipo “pushout” (Figura 48). Os modelos eram idênticos nas duas séries exceto pela eliminação, nos painéis da série modificada, dos pontos de desforma e transporte.

Uma outra seqüência de ensaios para avaliação de carga cíclica foi realizada com um modelo com dimensões de 145 x 488 cm com dois conectores espaçados de 61 cm.

A armadura utilizada era tela soldada em conjunto com armadura de protensão aplicada no centro de cada placa.

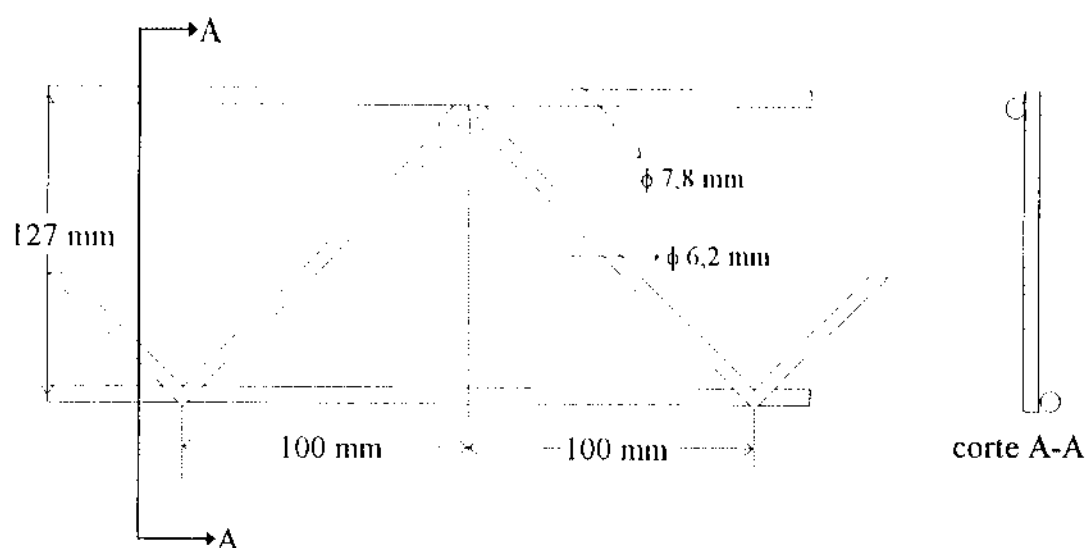


FIGURA 47 – Geometria da treliça metálica

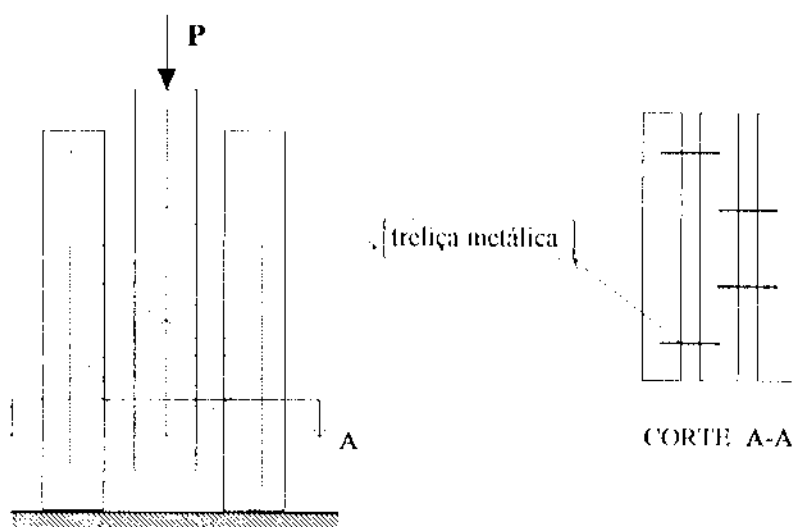


FIGURA 48 – Modelo tipo "pushout".

4.3.3 MOLDAGEM DOS MODELOS

Os painéis foram moldados em uma mesa plana na seguinte sequência :

- 1) pré-tracionamento da armadura de protensão da placa inferior;
- 2) posicionamento da armadura passiva e dos dispositivos de manuseio e desfôrma;
- 3) moldagem da placa inferior;
- 4) posicionamento dos conectores rígidos (treliças metálicas);
- 5) posicionamento do isolante;
- 6) pré-tracionamento da armadura de protensão da placa superior;
- 7) posicionamento da armadura passiva da placa superior;
- 8) moldagem da placa superior.

O concreto utilizado na moldagem apresentou resistência à compressão na idade da realização dos ensaios entre 37,9 e 41,4 MPa.

Observou-se os modelos produzidos de acordo com os critérios adotados na fábrica possuíam vários pontos de infiltração de concreto (principalmente nos locais dos pontos de levantamento e desfôrma, e em volta dos conectores). Essas “nervuras” extras formadas pela infiltração foram responsáveis por uma boa contribuição na transferência do cisalhamento.

Embora não tenha sido analisada, a eficiência térmica certamente foi bastante prejudicada nesses casos. Na série de painéis modificados foram utilizados seladores para evitar a infiltração do concreto e a formação de pontos extras de transferência de cisalhamento. Em nenhuma das séries utilizou-se qualquer tipo de antiaderente.

4.3.4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Os painéis foram ensaiados na horizontal com apoio simples e carga uniformemente distribuída aplicada de baixo para cima por meio de um colchão de ar.

O painel da série modificada submetido a carga cíclica foi ensaiado com uma carga concentrada aplicada no meio do vão. Utilizou-se um macaco hidráulico servo-controlado. Simulou-se o efeito da variação de temperatura através da aplicação de um esforço equivalente no painel.

Como estimativa inicial, simulou-se um diferencial de 10 °C entre as placas (interna e externa). A partir deste valor inicial, aplicavam-se alguns milhares de ciclos. Após a verificação de que não ocorrera perda na rigidez, um carregamento simulando condições mais severas era aplicado (Tabela 18)

TABELA 18 – Simulação de variação de temperatura para painéis (carga cíclica)

tensão média de cisalhamento (kPa)	número de ciclos aplicados
21,4	19750
26,9	9270
37,9	7020
43,4	17690
59,3	13970

4.3.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Apresentam-se a seguir (Figuras 49 e 50) os gráficos de carga aplicada versus deslocamentos medidos : resultados dos ensaios de flexão dos painéis, indicando-se também as retas correspondentes à previsão teórica de flechas no Estádio I, considerando-se comportamento composto e comportamento não-composto.

O gráfico da Figura 51 apresenta os resultados do ensaio com carregamento cíclico. As linhas verticais indicam mudança no valor da carga aplicada.

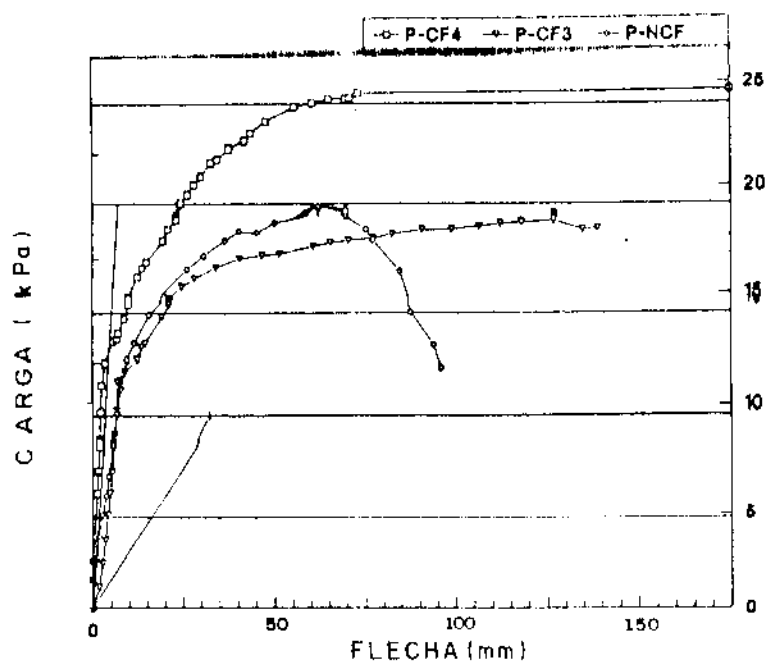


FIGURA 49 – Diagrama carga x deslocamento para painéis da série de produção.

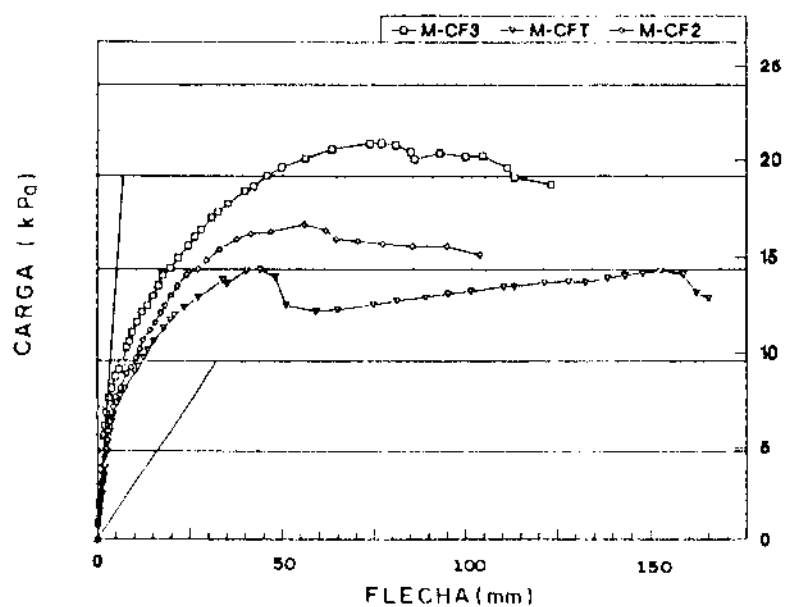


FIGURA 50 – Diagrama carga x deslocamento para painéis da série modificada.

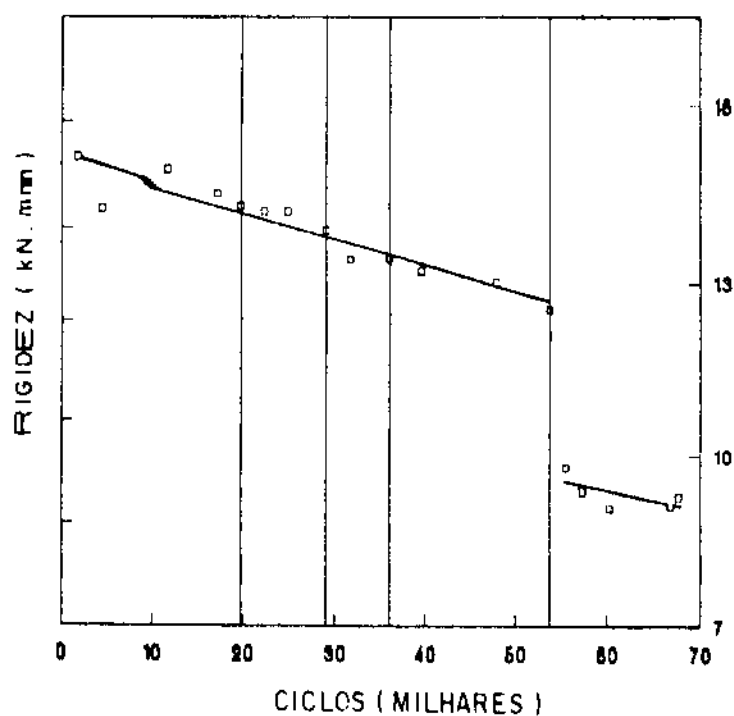


FIGURA 51 – Variação da rigidez nos ensaios cíclicos.

4.3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.3.6.1 Painéis submetidos à flexão

Apresentam-se na Tabela 19 dados comparativos sobre o comportamento dos painéis no que se refere ao momento de fissuração e ao momento último comparados com o valor teórico para o painel de comportamento composto.

TABELA 19 – Comparação dos momentos resistentes em relação ao painel composto

Painel	relação $\frac{M_{f,exp.}}{M_{f,teo.}}$	relação $\frac{M_{u,exp.}}{M_{u,teo.}}$
P-CF3	2,75	1,20
P-CF4	1,93	1,18
P-CNF	1,08	0,97
M-CF3	1,33	1,01
M-CF2	1,28	0,84
M-CFT	0,63	0,75

Os painéis P-CF3 e P-CF4 apresentaram comportamento próximo ao teoricamente composto e o painel P-CNF apresentou comportamento intermediário entre o composto e não-composto.

Os painéis M-CF3 e M-CF2 também apresentaram comportamento próximo ao teoricamente composto, com o painel M-CFT apresentando rigidez intermediária entre o comportamento composto e o não-composto.

Os painéis da série de produção apresentaram pequenos esforços medidos nos conectores de treliça metálica. Este fato leva a crer que uma boa parte do cisalhamento estava sendo transferido pela aderência entre placas e isolante, e mais ainda pelos pontos de desfôrma e transporte que constituíam “ nervuras” ou “ blocos de concreto” não planejados.

A série de painéis modificados comprovou que esses “pontos não planejados” eram responsáveis por uma boa parte da transferência do cisalhamento. Nesses painéis os conectores de treliça apresentaram esforços resistentes bem maiores.

4.3.6.2 Painéis submetidos a carga cíclica

Observou-se que nos painéis submetidos a carga cíclica houve uma redução de apenas 15% na rigidez inicial do painel após um total de 55000 ciclos. A descontinuidade apresentada no gráfico da Figura 51 deveu-se à fissuração do painel e conseqüente queda na rigidez. A continuação do ensaio após esse ponto resultou numa perda de rigidez de apenas 4% após uma seqüência de mais 12500 ciclos.

4.3.7 CONCLUSÕES

- Os detalhes construtivos da série de produção apresentam grande influência na transferência do cisalhamento.
- A aderência das placas com o isolante é responsável por uma parcela significativa na transferência do cisalhamento. Embora a contribuição pareça ser fraca, deve-se considerar que a área de contato é muito grande.
- A perda de aderência com o tempo é pequena, sugerindo que a contribuição pode ser considerada por toda a vida útil. Os ensaios cíclicos confirmam que a perda da aderência é muito pequena.
- A redundância na transferência do cisalhamento (treliça e aderência placas-isolante) permite uma redistribuição dos esforços e manutenção da resistência mesmo quando as barras da treliça (conector) atingem a ruptura : escoamento do banzo tracionado ou flambagem do banzo comprimido.
- Embora o poliestireno seja eficiente na transmissão do cisalhamento por aderência, outros tipos de isolantes podem não ser tão eficientes.

4.4 ESTUDO DO COMPORTAMENTO NA FLEXÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHE COM DISPOSIÇÃO VARIADA DE CONECTORES

4.4.1 OBJETIVO

O objetivo do trabalho de PFEIFER & HANSON (1965) era analisar as características gerais de painéis sanduíche tais como : tipo de isolante, espessura da placa e tipos de conectores. Trata-se de um dos mais extensos estudos experimentais disponíveis sobre painéis sanduíche.

4.4.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Foram realizados e ensaiados cerca de 50 modelos, dentre os quais 31 foram escolhidos para ilustrar os resultados obtidos. Os modelos mediam 91,5 x 152,4 cm. A espessura total do painel variou de 57,2 a 152,4 mm (Tabela 20)

As placas eram constituídas de concreto leve com argila expandida como agregado. Os modelos foram construídos alternando-se 5 tipos de isolantes, 3 tipos de conectores rígidos de metal e várias configurações de nervuras funcionando como conector rígido.

Os isolantes eram :

- um tipo de espuma de poliuretano
- dois tipos de espuma de poliestireno expandido
- fibra de vidro
- “foamed glass”
- concreto celular autoclavado

Os conectores metálicos eram três :

- chapa de metal expandida
- treliça metálica contínua
- tela soldada dobrada a partir da placa inferior

TABELA 20 – Detalhes dos modelos ensaiados por PFEIFER & HANSON (1965).

Painel	espessura (mm)	tipo de isolante	esp. isolante (mm)	tipo de conector	A _s por placa (cm ²)
A	57,2	poliuretano	25,4	treliça metálica	1,53 (1,05%)
B	63,5	poliuretano	25,4	chapa de metal	0,58 (0,54%)
C	63,5	poliuretano	25,4	135 blocos ϕ 25,4 mm	0,58 (0,54%)
D	101,6	poliuretano	50,8	tela soldada	0,58 (0,25%)
E	152,4	poliuretano	50,8	nenhum	0,58 (0,12%)
F	127,0	poliuretano	50,8	tela soldada	0,58 (0,17%)
G	127,0	poliuretano	50,8	chapa de metal	0,58 (0,17%)
H	127,0	poliuretano	50,8	nervuras borda(50,8mm)	0,58 (0,17%)
J	127,0	poliuretano	50,8	22 blocos ϕ 38,1 mm	0,58 (0,17%)
K	127,0	poliuretano	50,8	nervuras extr. (38,1 mm)	0,58 (0,17%)
L	127,0	poliuretano	50,8	nervuras borda + chapa	0,58 (0,17%)
M	152,4	poliuretano	50,8	tela soldada	0,58 (0,12%)
N	88,9	poliestireno	38,1	treliça metálica	1,53 (0,66%)
P	127,0	poliestireno	50,8	nenhum	0,58 (0,17%)
R	127,0	poliestireno	50,8	nenhum	0,79 (0,23%)
S	127,0	poliestireno	50,8	nenhum	0,58 (0,17%)
T	127,0	poliestireno	50,8	tela soldada	0,58 (0,17%)
U	127,0	poliestireno	50,8	treliça metálica	1,53 (0,44%)
V	127,0	poliestireno	50,8	treliça metálica	1,53 (0,44%)
W	127,0	poliestireno	50,8	chapa de metal	0,79 (0,23%)
X	127,0	poliestireno	50,8	135 blocos ϕ 25,4 mm	0,58 (0,17%)
Y	127,0	poliestireno	50,8	nervuras borda(38,1mm)	0,58 (0,17%)
Z	152,4	poliestireno	50,8	treliça metálica	1,53 (0,44%)
AA	127,0	fibra de vidro	50,8	tela soldada	0,58 (0,17%)
BB	127,0	fibra de vidro	50,8	treliça metálica	1,53 (0,44%)
CC	127,0	fibra de vidro	50,8	treliça metálica	1,53 (0,44%)
DD	127,0	foamed glass	50,8	tela soldada	0,58 (0,17%)
EE	127,0	foamed glass	50,8	treliça metálica	1,53 (0,44%)
FF	76,2	concreto celular	38,1	nenhum	0,58 (0,33%)
GG	88,9	concreto celular	38,1	nenhum	0,58 (0,25%)
HH	127,0	concreto celular	50,8	nenhum	0,58 (0,17%)

4.4.3 MOLDAGEM DOS MODELOS

Os painéis foram moldados em fôrma disposta sobre mesa vibratória. A sequência de moldagem foi a seguinte :

- 1) ligação entre conectores e armadura da placa inferior;
- 2) posicionamento do conjunto anterior na fôrma;
- 3) preparação de uma quantidade pré-selecionada de concreto de acordo com a espessura definida para a placa inferior;
- 4) moldagem da placa inferior, vibrando-se a mesa;
- 5) posicionamento do isolante entre os conectores;
- 6) posicionamento da armadura superior, providenciando-se a devida amarração aos conectores;
- 7) moldagem da placa superior com nova vibração;
- 8) cura em câmara úmida por 7 dias a 23 °C e posteriormente a 23 °C e 50% de umidade por mais 21 dias.

O concreto utilizado na moldagem apresentou resistência à compressão aos 28 dias entre 34,0 e 46,0 MPa.

4.4.4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Os painéis foram ensaiados empregando-se uma bolsa de ar para aplicação de carga uniformemente distribuída, macaco hidráulico, estrutura de reação e outros dispositivos para caracterizar um elemento simplesmente apoiado submetido a carga uniformemente distribuída.

A sequência de atividades era a seguinte :

- 1) posicionamento do painel sobre a bolsa de ar localizada na base da máquina;
- 2) redução da pressão na bolsa até que a mesma estivesse totalmente em contato com o painel;
- 3) posicionamento das vigas de reação : abaixando-se o dispositivo até encostar no painel;
- 4) são aplicadas as forças no painel por intermédio de acréscimo na pressão da bolsa de ar. O incremento era de 22,68 N ou 16,21 N/m²;
- 5) cada etapa de carregamento é mantida por um período de tempo suficiente para medir os deslocamentos e marcar a posição das fissuras visíveis;
- 6) os deslocamentos eram acompanhados por instrumentos localizados no meio do vão, nos quatros cantos e nas extremidades do painel.
- 7) o ensaio é realizado em duas etapas : carga e descarga.

Embora os modelos tenham sido ensaiados até a ruptura, a análise dos resultados foi restrita a esforços inferiores ao correspondente momento de fissuração da peça.

4.4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Apresenta-se a seguir tabela com os resultados de ensaios de flexão nos painéis: valores do momento de fissuração, deslocamento vertical (flecha) e deslocamento relativo entre as placas (na força equivalente ao momento de fissuração).

TABELA 21 – Resultados dos ensaios de flexão de PFEIFER & HANSON (1965).

Painel	momento de fissuração (kN.cm)	flecha equivalente (mm)	deslocamento relativo entre placas (mm)	momento de ruptura (kN.cm)	tipo de ruptura
A	100,5	2,41	0,05	443,6	cisalhamento
B	144,5	2,59	não medido	250,6	flexão
C	100,5	2,51	não medido	128,7	cisalhamento
D	106,0	2,21	0,36	363,4	cisalhamento
E	106,0	1,91	0,28	430,2	flexão
F	112,9	1,32	0,15	561,2	flexão
G	188,5	0,30	0,05	692,0	flexão
H	188,5	0,28	0,00	420,0	flexão
J	112,9	1,42	0,08	391,7	flexão
K	180,3	1,27	0,05	256,2	flexão
L	338,7	0,43	0,05	866,0	flexão
M	225,8	0,64	0,05	709,0	flexão
N	187,5	1,04	0,05	783,6	flexão
P	93,7	0,64	0,08	361,1	cisalhamento
R	112,9	1,22	0,08	326,3	cisalhamento
S	71,1	0,58	0,10	420,1	flexão
T	112,9	0,46	0,05	502,5	flexão
U	248,4	0,38	0,03	977,7	flexão
V	188,5	0,36	0,03	963,2	flexão
W	225,8	0,84	0,03	880,7	flexão
X	217,9	0,38	0,03	338,6	flexão
Y	225,8	0,30	0,00	449,3	flexão
Z	282,3	0,28	0,00	1208,1	flexão
AA	105,0	1,09	0,13	256,4	cisalhamento
BB	187,5	0,46	0,03	677,5	rup. no apoio
CC	187,5	0,30	0,00	688,4	rup. no apoio
DD	263,0	0,36	0,00	346,0	flexão
EE	263,0	0,48	0,00	873,0	flexão
FF	66,6	0,69	não medido	193,1	flexão
GG	105,0	0,51	não medido	238,1	flexão
HH	301,4	0,51	0,00	466,4	flexão

ruptura por cisalhamento = deslocamento relativo entre placas excessivo.

ruptura por flexão = escoamento da armadura do painel.

ruptura no apoio = esmagamento do concreto sob os pontos de apoio.

4.4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.4.6.1 Avaliação teórica

A análise estrutural dos painéis pode ser feita considerando-se duas condições de comportamento :

- a) painel de comportamento composto;
- b) painel de comportamento não-composto.

4.4.6.2 Análise do momento de fissuração

a) caso de comportamento composto : o momento de inércia a ser considerado é o descrito em 3.4.1. (Capítulo 3) :

$$I_c = \frac{1}{12} b \cdot (t^3 - t_1^3) + 2 \cdot (\alpha_e - 1) \cdot A_s \cdot d_i^2 \quad (25)$$

o momento de fissuração é dado por : $M_r = \frac{\sigma_{sp} \cdot I_c}{y}$

b) caso de comportamento não-composto : o momento de inércia a ser considerado é o descrito no Capítulo 3 :

$$I_{nc} = \frac{1}{12} b \cdot (t_1^3 + t_2^3) \quad (26)$$

o momento de fissuração é dado por : $M_r = \frac{\sigma_{sp} \cdot I_{nc}}{y}$

σ_{sp} = tensão média de fendilhamento determinada nos ensaios

$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c}$ foi adotado como sendo igual a 12, segundo os resultados experimentais

y = distância da linha neutra até a fibra mais tracionada : t/2

4.4.6.3 Influência do tipo de isolante

A influência do tipo de isolante pode ser observada na Figura 6 do Capítulo 2. A resistência superior e comportamento mais próximo do composto em painéis com núcleo de concreto celular e “foamed glass” parece que se deve ao elevado módulo de elasticidade desses materiais (cerca de 1200 MPa) em relação às espumas (menor que 7 MPa).

4.4.6.4 Influência do tipo de conector

Os resultados dos ensaios não deixam dúvidas de que o tipo de conector é a variável mais importante no comportamento estrutural do painel (Figura 52). Os conectores de tela soldada (Painel F) oferecem pequena contribuição à composição entre as placas. Isto deve-se à geometria da tela soldada utilizada como conector : barras verticais ligando os banzos horizontais. Esta configuração na verdade é de conector flexível.

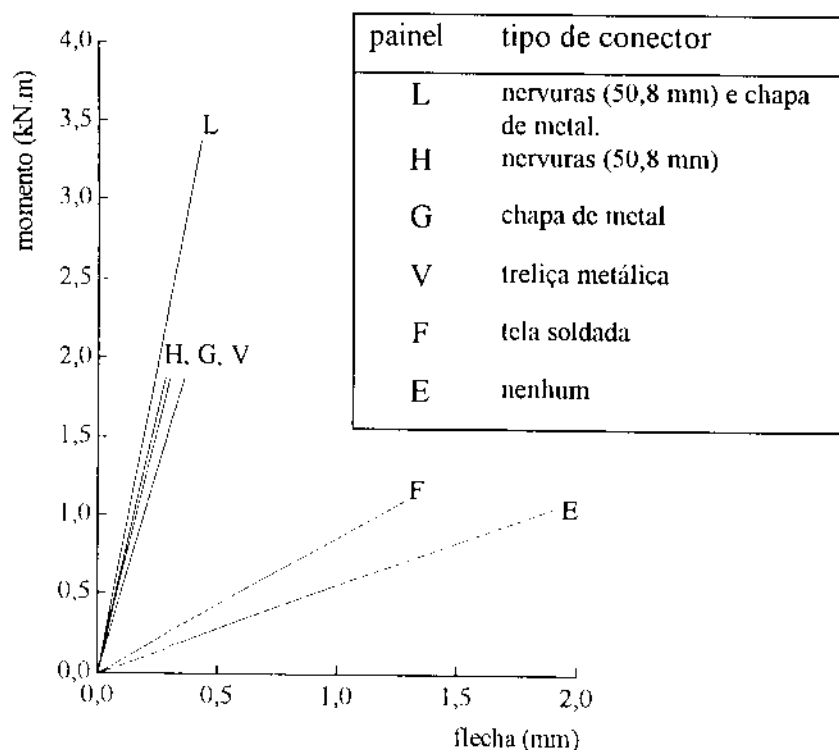


FIGURA 52 – Diagrama momento x flecha segundo o tipo de conector

As nervuras oferecem enorme contribuição à composição entre as placas. Nesta série de ensaios, buscou-se estudar uma disposição de nervuras que proporcionasse maior área disponível de isolante mantendo-se a mesma rigidez lateral (Figura 53 e 54).

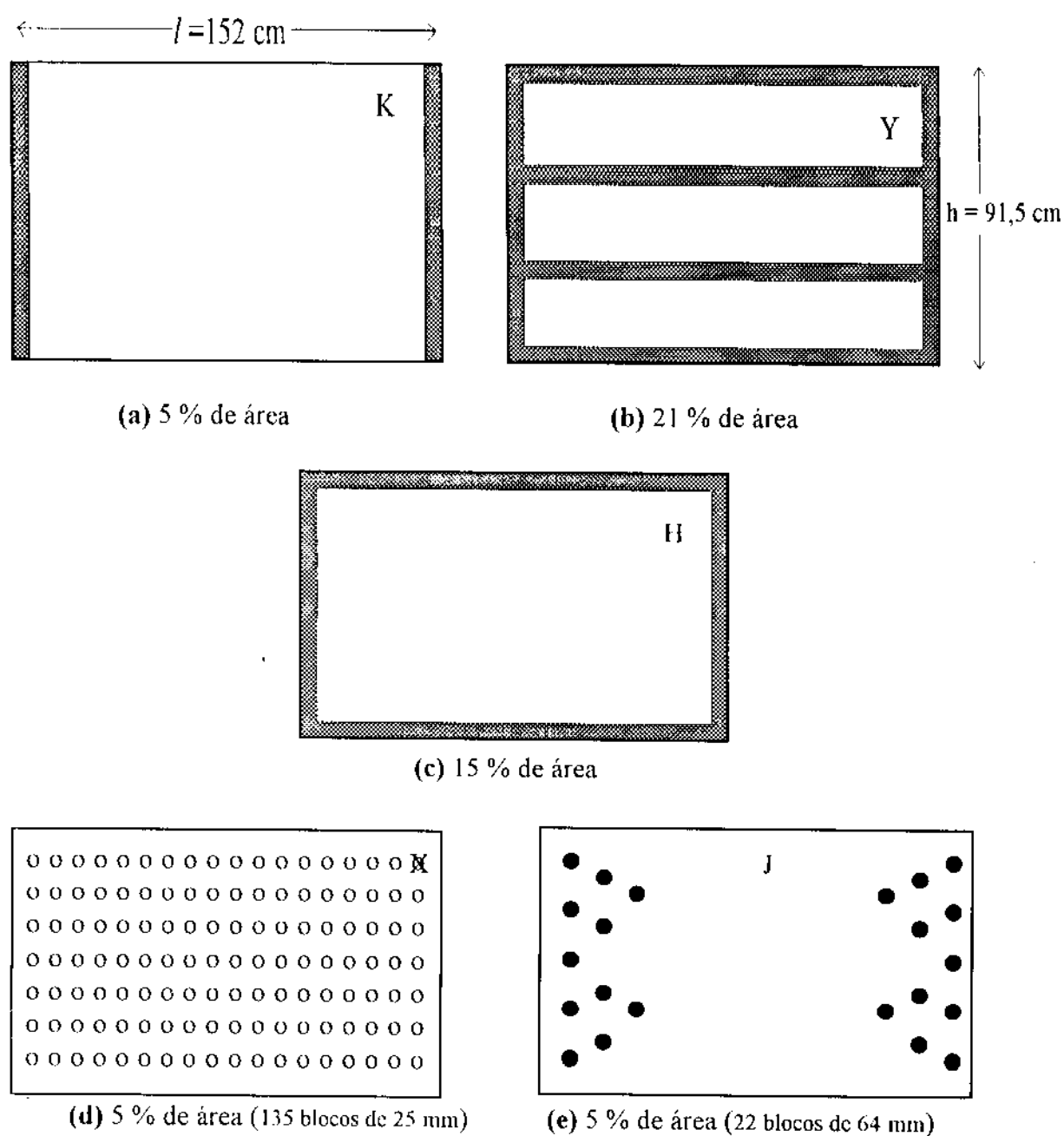


FIGURA 53 – Tipos de painéis nervurados estudados por PFEIFER & HANSON.

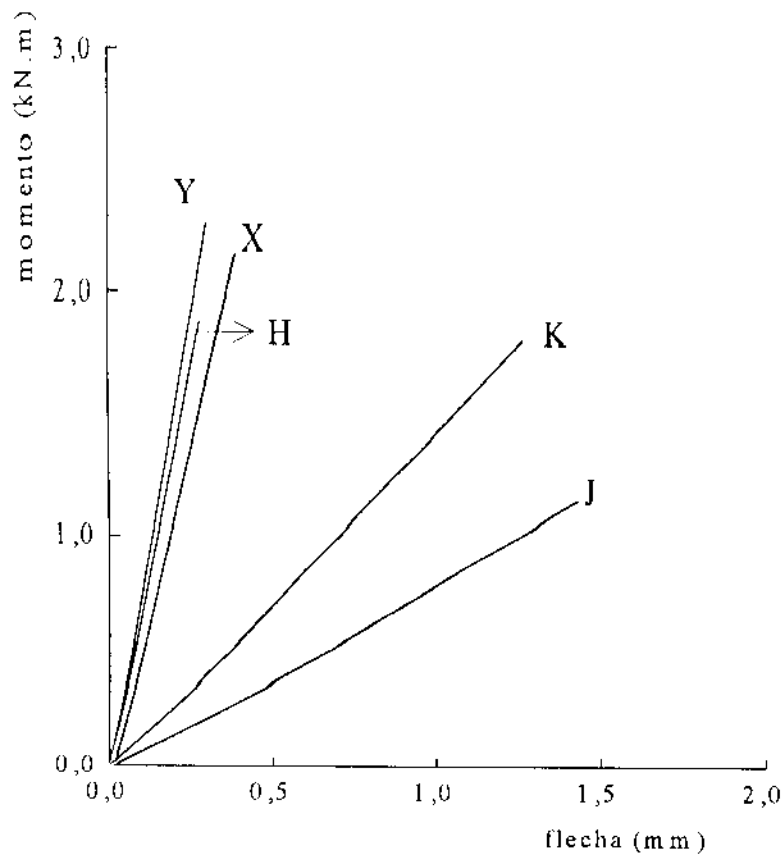


FIGURA 54 – Diagrama momento x flecha para os painéis nervurados

4.4.7 CONCLUSÕES

- O momento de fissuração em painéis sanduíche com conectores de concreto ou metal variaram entre 40 e 70 % do momento equivalente ao comportamento composto, com média de 48 %.
- Os conectores do tipo nervura proporcionam um elevado grau de composição entre as placas de concreto.
- Os conectores de tela soldada são pouco eficientes na transferência do cisalhamento

- Para uma melhor avaliação da resistência de painéis sanduíche em relação à formação de fissuras, propõe-se coeficientes de segurança para painéis submetidos a carga de vento inferior a $1,0 \text{ kN/m}^2$ de acordo com o tipo de conector utilizado :

TABELA 22 – Coeficientes de segurança para fissuração em painéis sanduíche submetidos a ação do vento.

Comprimento do painel (cm)	conector de concreto ou de metal	conector de concreto e de metal
244	4,0	5,8
305	2,5	3,6
366	1,7	2,5

- O uso de painéis com nervuras situadas apenas nas bordas transversais proporcionou menor restrição às placas que painéis com nervuras ao longo de todo o perímetro.
- O uso de pequenos blocos de concreto distribuídos uniformemente ao longo da superfície do painel parece que proporcionou um comportamento estrutural similar ao uso de nervuras contínuas ao longo das bordas com mínima perda de isolamento.

5 LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos de cálculo das ligações de painel para painel de acordo com o seccionamento da planta de arquitetura, que deve ser definido no anteprojeto. O cálculo está fundamentado nas recomendações apresentadas pelo COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB) de 1985 e deve ser feito em observância à norma brasileira NBR-9062 (1985) de pré-moldados.

A assim chamada ligação compreende não somente a região entre os painéis pré-moldados, mas também quaisquer elementos que participem da resistência estrutural da ligação e mais ainda a argamassa de preenchimento.

O projeto das ligações, incluindo todos os detalhes construtivos mais a seqüência de operações, é de fundamental importância para a otimização do processo de montagem. Quanto mais tempo for gasto no projeto das ligações, menos tempo será desperdiçado na obra em eventuais ajustes.

São vários os recursos disponíveis para providenciar a ligação entre elementos pré-moldados, entre eles, segundo EL DEBS (1992)⁸, poderíamos citar os conectores metálicos (soldados ou aparafusados), armadura saliente com concretagem

⁸ EL DEBS, M. K. Estruturas pré-moldadas de concreto. Notas de aula, 1992.

no local, conformação superficial por meio de encaixes e cabos de protensão entre outros. Neste capítulo, serão tratadas apenas as ligações constituídas de concretagem no local.

5.2 VINCULAÇÃO

Em painéis não-estruturais ou de vedação, é preciso muita atenção no detalhamento das ligações para que a mesma não produza restrições indesejadas no painel (vinculação hiperestática). O PCI Design Handbook (1992) Recomenda que sejam utilizadas no máximo duas ligações por painel com finalidade exclusiva de transferência do peso próprio. Este tipo de painel deve, preferencialmente, ser conectado pela extremidade inferior. Segundo o PCI Manual (1977), painéis suspensos devem ser evitados pois estão submetidos a esforços de tração que seriam resistidos apenas pela armadura. Nos casos em que for impossível evitar os painéis suspensos, deve-se reforçar a espessura em torno dos pontos de fixação.

O painel estrutural deve ser conectado aos painéis adjacentes de forma contínua e rígida para que a estrutura comporte-se como monolítica, ou bem próximo disso. É importante avaliar a flexão térmica dos painéis e evitar a flexão diferenciada entre painéis e provável surgimento de fissuras nas ligações.

5.3 LIGAÇÕES EM PAINÉIS ESTRUTURAIS

A ligação entre painéis estruturais deve promover a transferência de esforços contidos no mesmo plano do painel. De acordo com a posição do seu eixo longitudinal, a ligação pode ser vertical ou horizontal. O CEB (1985) prefere dividir as ligações segundo o tipo de esforço que transmitem : cisalhamento ou compressão. Esta divisão deve-se ao fato de que tanto em ligações verticais como em ligações

horizontais os esforços de cisalhamento e de compressão podem ser importantes para o dimensionamento da ligação. No desenvolvimento deste capítulo, seguiremos a divisão das ligações segundo o tipo de esforço como é apresentado pelo CEB. Cada tipo de ligação ainda possui subdivisões que serão detalhadas no item correspondente.

5.4 LIGAÇÕES DE CISALHAMENTO

A ligação de cisalhamento é assim chamada por transmitir essencialmente o esforço na direção do próprio eixo da ligação do painel. O esforço cortante (V) é transferido pela ligação através da argamassa moldada no local e pela armadura disposta na ligação, se for o caso (figura 60). Podemos distinguir dois tipos de ligações de cisalhamento :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ligação plana} \left\{ \begin{array}{l} \text{superfície lisa} \\ \text{superfície rugosa} \end{array} \right. \\ \text{ligação com chaves} \left\{ \begin{array}{l} \text{concentradas} \\ \text{distribuídas} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

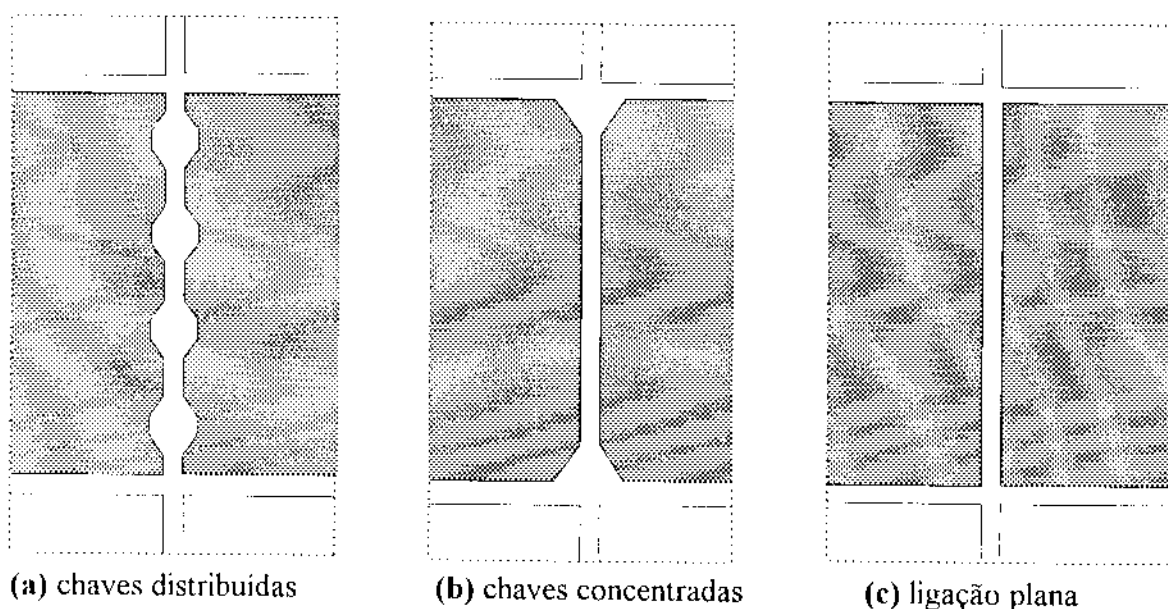


FIGURA 55 – Tipos de ligação de cisalhamento (CEB,1985)

A ligação plana pode ser de superfície lisa ou rugosa conforme o acabamento na borda do painel. A ligação plana com superfície rugosa seria aquela em que a superfície do concreto não possui acabamento algum, enquanto que a ligação plana de superfície lisa ocorre quando é providenciado um acabamento superficial na borda do painel ou quando o mesmo é produzido em fôrma lisa.

Além da classificação para as ligações apresentada anteriormente, as ligações de cisalhamento ainda podem ser abertas ou fechadas quanto à proteção da região de preenchimento (Figura 56).

Para o caso de painéis sanduíche, devido à espessura relativamente reduzida das placas, as ligações fechadas seriam de uso improvável. Embora na grande maioria dos casos a região entre as duas placas seja preenchida com argamassa, acreditamos que não seja caracterizada a ligação fechada, pois a argamassa não teria contato com a área t_i (Figura 56.d), que seria de isolante. Assim, a ligação entre painéis adjacentes seria do tipo aberta onde tratamos a ligação como sendo entre dois painéis paralelos (as duas placas).

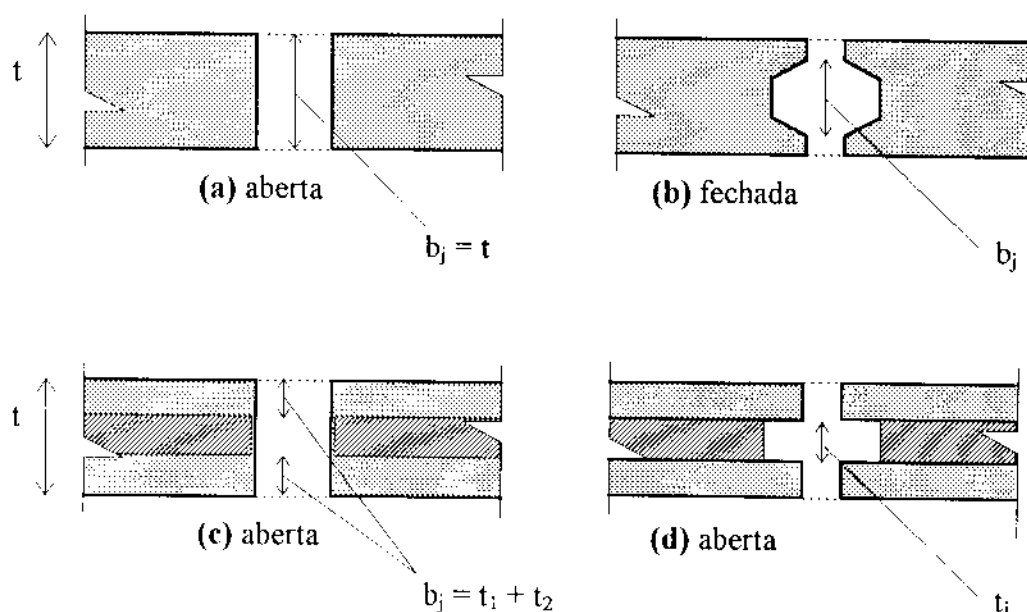


FIGURA 56 – Ligações segundo a proteção da região de preenchimento.

(a) e (b) : em painéis comuns ; (c) e (d) em painéis sanduíche.

Segundo BLJUGER (1988), as ligações constituídas de chaves de cisalhamento possuem menor deformabilidade com distribuição mais definida de esforços na estrutura. A estrutura, de maneira geral, aproxima-se de uma estrutura monolitica equivalente. Na Figura 57 apresentam-se os detalhes da geometria da chave de cisalhamento e a notação utilizada nas equações apresentadas a seguir.

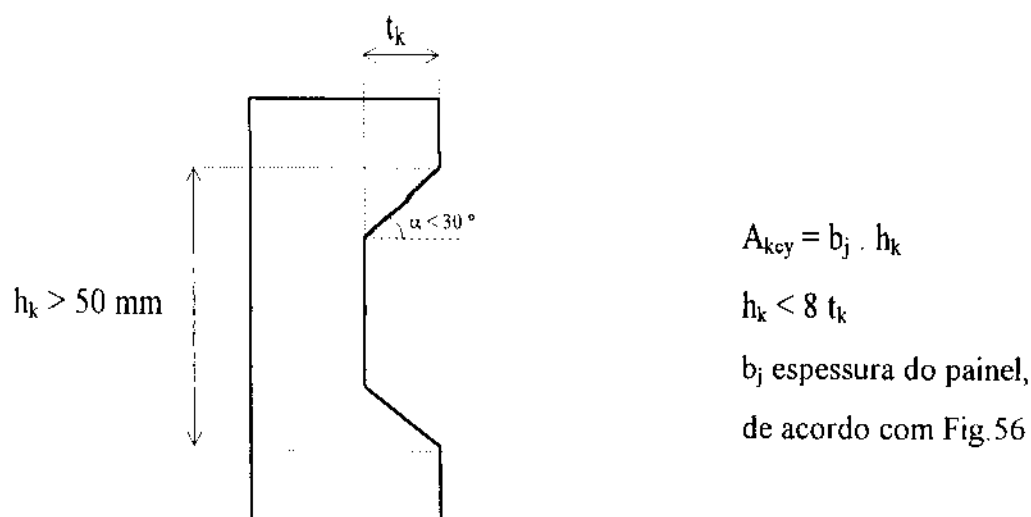


FIGURA 57 – Geometria das chaves de cisalhamento

Para os painéis sanduíche, poderíamos executar dois tipos de ligação :

1. Na ligação de topo entre dois painéis, poderia-se executar a ligação com chaves de cisalhamento nas placas e concretagem no espaço interno reservado ao isolante (Figura 58). Assim, a ligação ficaria mais rígida, e a perda de isolamento térmico devido à troca do isolante pela argamassa na região da ligação não seria significativa quando analisada na edificação como um todo.

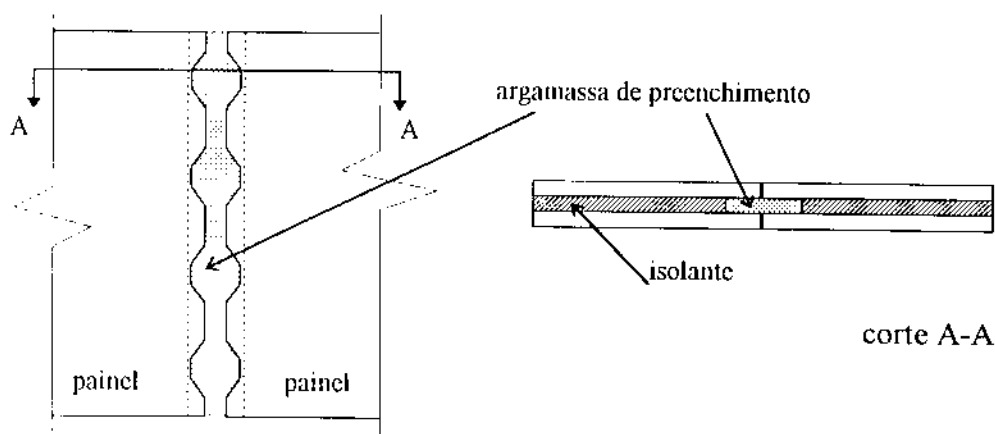


FIGURA 58 – Ligação de topo entre dois painéis contidos no mesmo plano.

2. As demais ligações, que ocorrem nos cantos, poderiam ser ligações planas. Esse tipo de ligação é mais simples de ser executado e não exige alterações na geometria do painel. Esta ligação também seria executada com preenchimento de argamassa num trecho reservado ao isolante para dar maior rigidez à ligação.

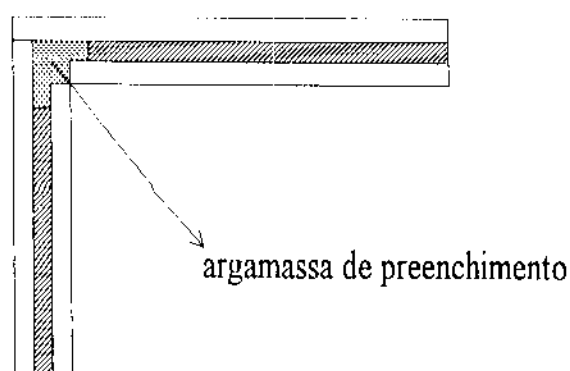


FIGURA 59 – Ligação de canto entre painéis

A armadura transversal necessária para as ligações de cisalhamento, para ligações planas ou com chaves, sem considerar a contribuição de um eventual esforço normal de compressão é :

$$A_s \geq 0,01 A_j \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (27)$$

$A_j = b_j \cdot l_j$ = área da ligação

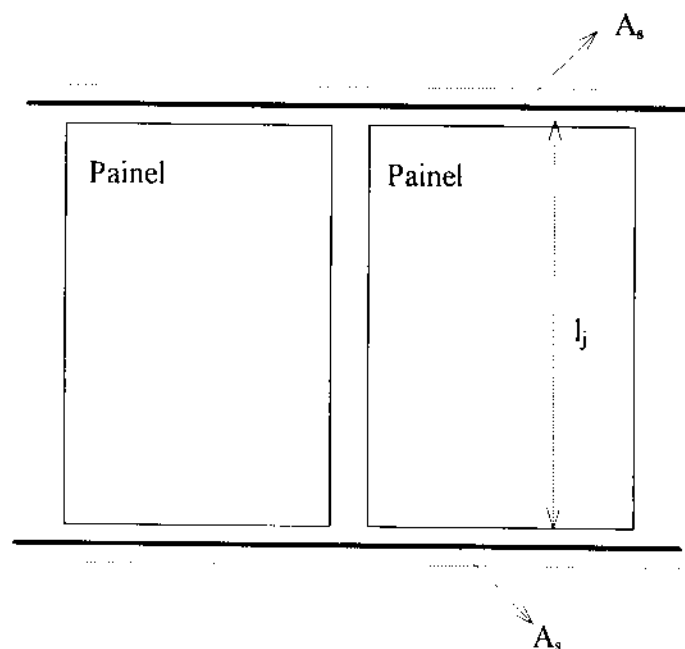


FIGURA 60 – Posição da armadura concentrada na cinta dos painéis (CEB, 1985).

Nos casos em que o painel possuir aberturas próximas à sua extremidade, somente o comprimento l_z deve ser considerado como responsável pela transmissão do cisalhamento :

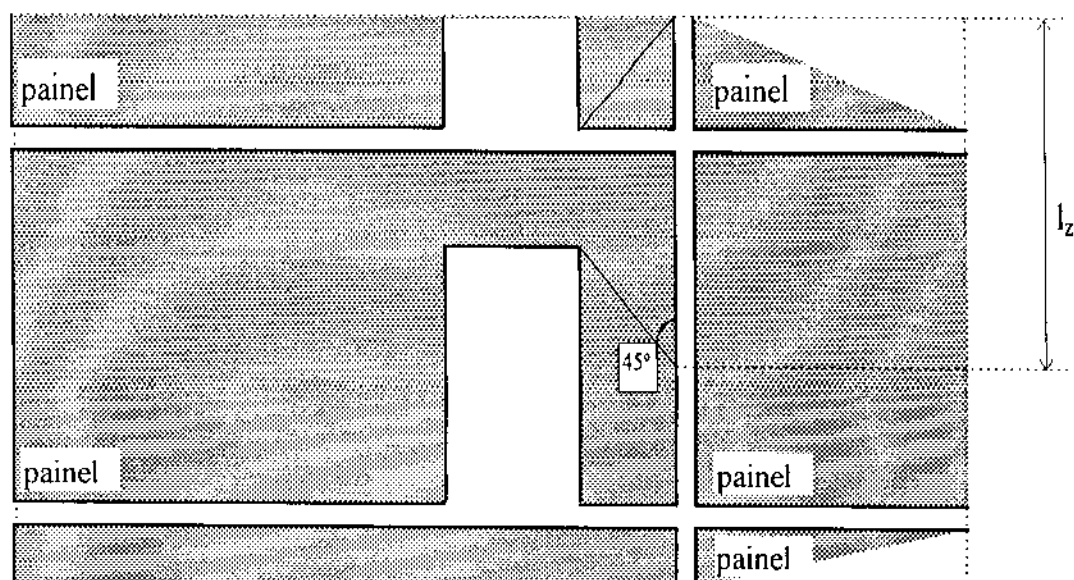


FIGURA 61 – Comprimento da ligação em painéis com aberturas (CEB, 1985).

5.4.1 RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO DE CISAIIAMENTO

A resistência da ligação de cisalhamento é o valor do máximo esforço cortante que pode ser resistido pela ligação. A resistência de projeto (R_{jvd}) depende da natureza dos esforços normais que atuam em conjunto com o cisalhamento. Isto deve-se ao fato de que a ação de um esforço normal de compressão aumenta a resistência ao cisalhamento da ligação pelo efeito do atrito, enquanto um esforço normal de tração reduz a resistência máxima da ligação.

no caso de esforço normal de compressão atuando na ligação :

$$\frac{A_s \cdot f_{yd} + N_d}{A_j \cdot f_{cd}} \leq 0,15 :$$

$$R_{jvd} = \frac{1}{\gamma_d} \left[\beta_1 \cdot A_{kcy} \cdot f_{cd} + \beta_2 \cdot (A_s \cdot f_{yd} + N_d) \right] \leq 0,3 A_j \cdot f_{cd} \quad (28)$$

$$\frac{A_s \cdot f_{yd} + N_d}{A_j \cdot f_{cd}} > 0,15 :$$

$$R_{jVd} = \frac{1}{\gamma_d} \left[(\beta_1 \cdot A_{key} + 0,02 A_j) \cdot f_{cd} + \beta_3 (A_s \cdot f_{yd} + N_d) \right] \leq 0,3 A_j \cdot f_{cd} \quad (29)$$

$$N_d \geq 0,6 \cdot A_j \cdot f_{cd} \quad : \quad R_{jVd} = \frac{1}{\gamma_d} (0,6 \cdot A_j \cdot f_{cd} - 0,5 \cdot N_d) \quad (30)$$

no caso de esforço normal de tração atuando na ligação :

$$N_d \leq A_s \cdot f_{yd} \Rightarrow$$

$$R_{jVd} = \frac{1}{\gamma_d} \left[\beta_1 \cdot A_{key} \cdot f_{cd} + \beta_2 \cdot (A_s \cdot f_{yd} - N_d) \right] \left(1 - \frac{N_d}{A_s \cdot f_{yd}} \right) \quad (31)$$

$$A_{key} = b_j \cdot h_k \cdot n^\circ \text{ de chaves}$$

$$A_j = b_j \cdot l_j$$

TABELA 23 – Coeficientes β_1 , β_2 e β_3 segundo a distribuição da armadura.

tipo de ligação	β_1	β_2		β_3	
		disposição da armadura distribuída	concentrada	disposição da armadura distribuída	concentrada
plana lisa	0	0,6	0,5	0,5	0,4
plana rugosa	0	0,9	0,7	0,75	0,6
em chave	0,07	0,9	0,9	0,75	0,6

TABELA 24 – Coeficientes de segurança (γ_d) para ligações contínuas de cisalhamento

Tipo de ligação	γ_d
aberta	1,15
fechada ($b_j \leq 60$ mm)	1,33
fechada ($b_j > 60$ mm)	1,25

OBSERVAÇÕES :

1. O esforço normal N_d nas fórmulas (28) a (31) está em valor absoluto;
2. O coeficiente β_1 representa a contribuição da argamassa de preenchimento;
3. O coeficiente β_2 representa a contribuição da armadura transversal e da força normal;
4. O coeficiente β_3 deve ser reduzido em 30% devido ao uso de argamassa como preenchimento (o valor apresentado refere-se ao concreto);
5. f_{cd} é a resistência da argamassa de preenchimento;
6. A resistência R_{vd} deve ser reduzida em 30 % nas ligações de canto devido à flambagem, quando a armadura for disposta na cinta de amarração (Figura 62)

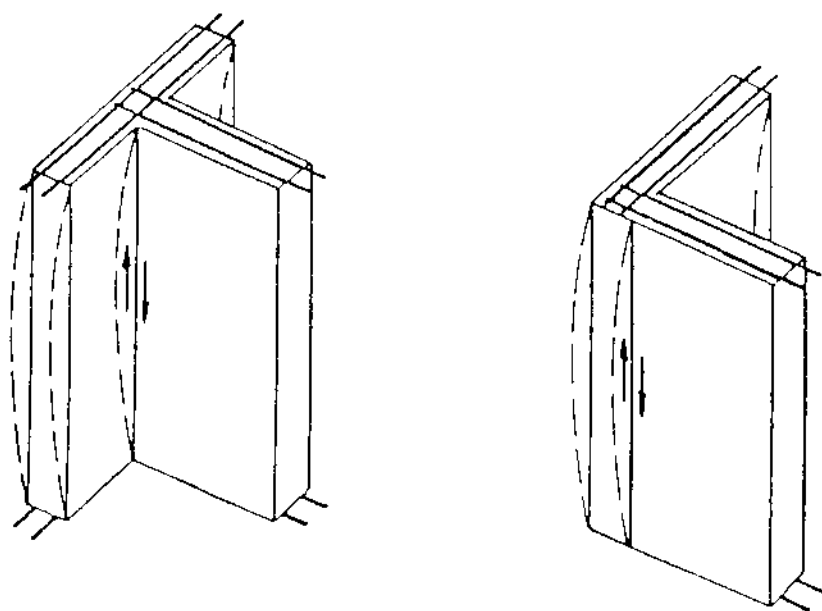


FIGURA 62 – Ligações de canto com o painel sujeito à flambagem.

Segundo BLJUGER (1988), as ligações em chave de cisalhamento devem ser verificadas para dois tipos de ruptura :

1. ruptura por esmagamento local do concreto (Figura 63.a);
2. ruptura por cisalhamento da chave (Figura 63.b).

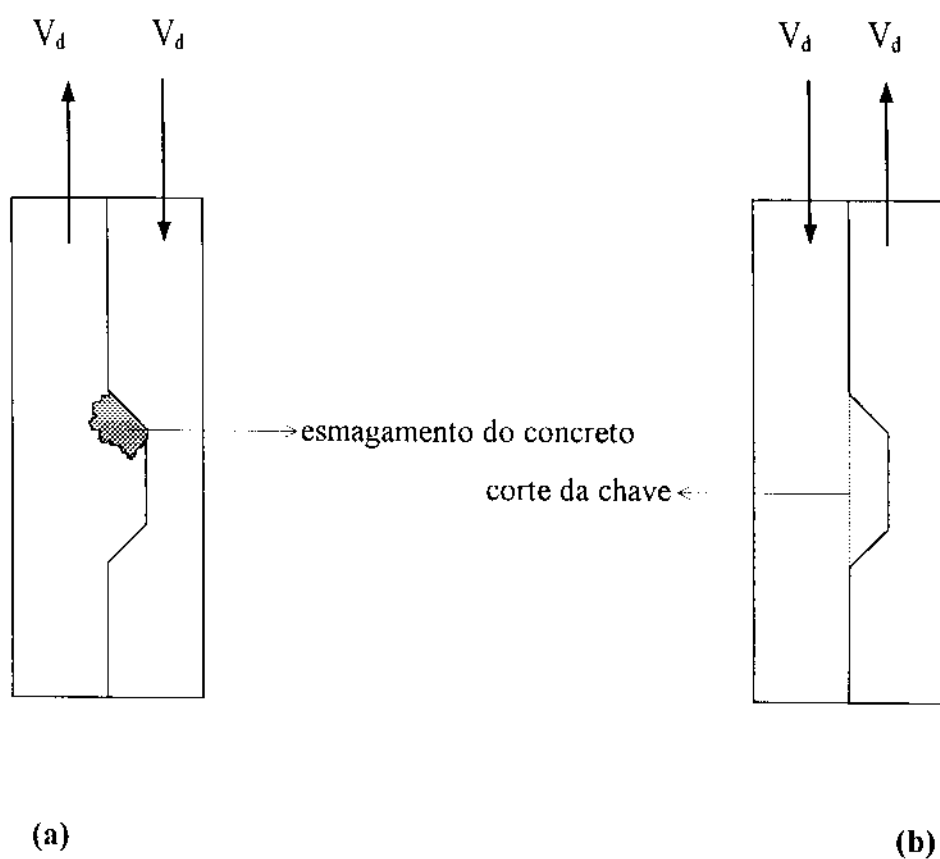


FIGURA 63 – Tipos de ruptura em ligações com chaves

A verificação seria feita para os dois casos acima :

1. esmagamento do concreto : $V_d = 1,5 f_{cd} \cdot A_{ks}$
2. corte da chave : $V_d = 1,5 f_{td} \cdot A_{key}$

$$A_{ks} = t_k \cdot b_j$$

5.5 LIGAÇÕES DE COMPRESSÃO

As ligações de compressão são as que transmitem os esforços perpendiculares ao eixo da ligação, geralmente esforços normais de compressão, daí o nome da ligação. Nos painéis de grandes dimensões, as ligações de compressão seriam as ligações horizontais entre painéis de andares imediatamente superior ou inferior, entre painéis paredes e painéis de lajes, e nos casos mais comuns, a coincidência de dois painéis parede com o painel de laje intermediária (figura 64).

As ligações de compressão podem ser classificadas em ligação estreita ($a_t \geq 25 \text{ mm}$) e ligação larga de acordo com a espessura da argamassa moldada no local.

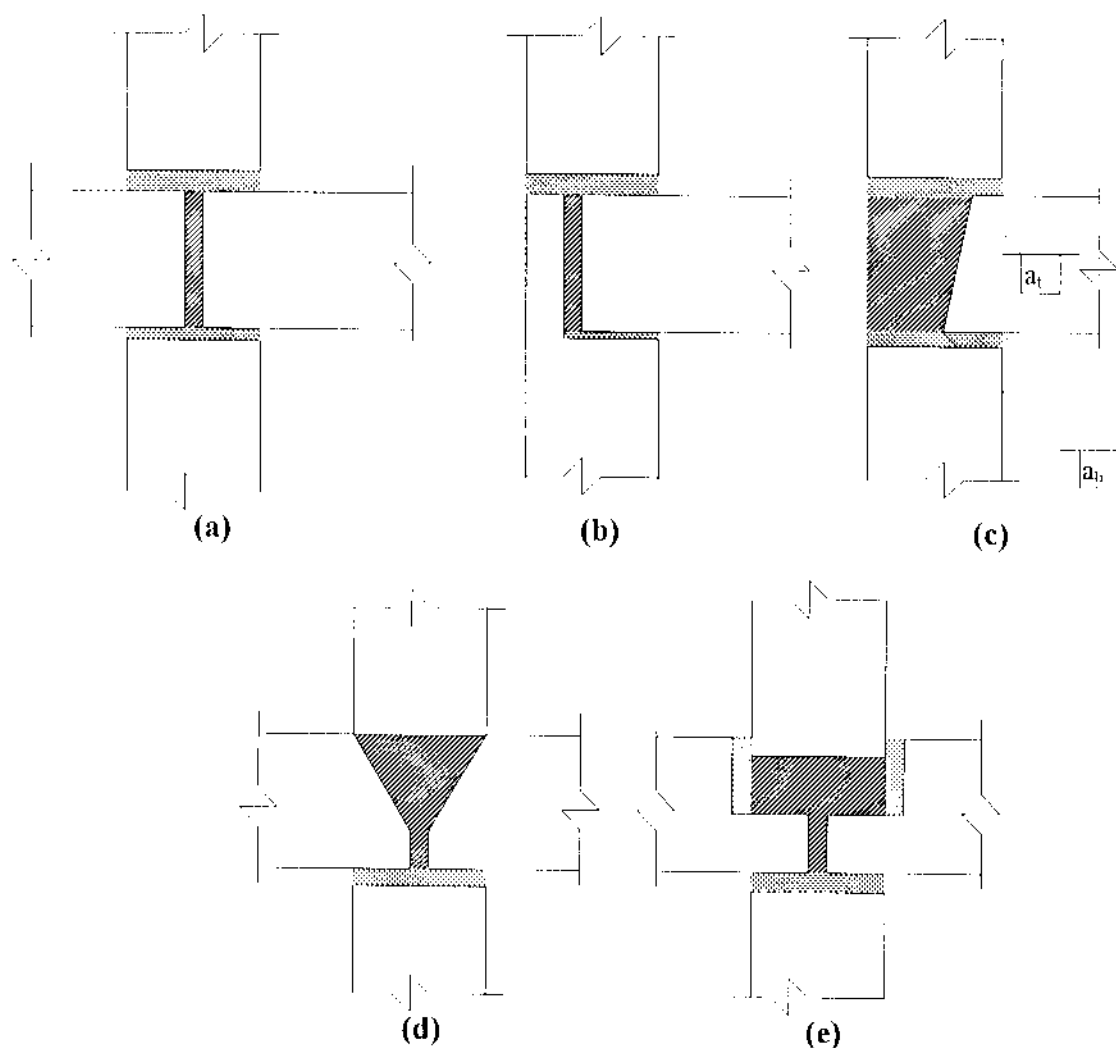


FIGURA 64 – Ligações de compressão: a-c = estreitas; d-e = largas.

Em lajes apoiadas sobre painéis, o comprimento a_b (Figura 64.c) de apoio é determinado com base nas condições de apoio e imprecisões construtivas (Δ).

Para lajes menores que 6,0 m e $\Delta \leq 10$ mm :

a_b , mín. = 40 mm para lajes com armadura de espera;

a_b , mín. = 60 mm para lajes sem armadura de espera, apoiada em dois lados;

a_b , mín. = 40 mm para lajes apoiadas em três ou quatro lados.

O comprimento de ancoragem para a armadura de espera (a_s) da laje deve ser :

$a_s = 4 \phi$ para lajes com telas soldadas;

$a_s = 5 \phi$ para lajes armadas com barras.

OBSERVAÇÕES :

1. Os valores para a_b podem ser reduzidos no caso em que as lajes possuam algum tipo de apoio provisório durante a montagem.
2. Em painéis sanduíche, é preciso considerar os casos em que a laje está apoiada em somente uma das placas.

5.5.1 RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO DE COMPRESSÃO

A resistência da ligação de compressão é determinada pela resistência da seção transversal do painel (ligação estreita) ou pela seção transversal da região de argamassa de preenchimento (ligação larga). Em ambos os casos, deve-se avaliar a resistência da ligação em função da resistência do concreto do painel (f_{cd}).

$$R_{jNd} = R_j = \eta_i \cdot A_{wall} \cdot f_{cd} \cdot \frac{l}{\gamma_d \cdot \gamma_{nl}} \quad (32)$$

A_{wall} = área da seção transversal do painel que serve de apoio

η_i = coeficiente para considerar a redução do painel devido à presença da ligação

$\gamma_d \cdot \gamma_{nl}$ = coeficiente de segurança para a ligação de compressão

TABELA 25 – valores para η_i *

Tipo de ligação	laje de piso apoiada em :	
	um só lado	nos dois lados
ligação estreita :		
$l_f \leq 4,8 \text{ m}$	0,50	0,60
$4,8 < l_f \leq 6,0 \text{ m}$	0,45	0,55
ligação larga :		
$f_{c,joint} > 0,80 f_{c,wall}$	0,75	0,80
$0,80 f_{c,wall} > f_{c,joint} > 0,60 f_{c,wall}$	0,50	0,65

TABELA 26 – valores para $\gamma_d \cdot \gamma_{nl}$

Tipo de ligação	$\gamma_d \cdot \gamma_{nl}$
ligação estreita :	
onde a porção do painel na ligação possui armadura	1,0
onde a porção do painel na ligação não possui armadura	1,15
ligação larga :	
com lajes de piso em ambos os lados do apoio	1,0
com lajes de piso em apenas um lado do apoio com armadura na laje de pelo menos 3 barras por m. linear	1,0
com lajes de piso em apenas um lado do apoio sem armadura na laje	1,125

* A determinação exata de η_i é muito trabalhosa e desprovida de sentido para os casos usuais. A Tabela 25 apresenta valores simplificados apresentados pelo CEB (1985).

5.6 DETALHES CONSTRUTIVOS

Diversos autores (PCI Manual (1977), SCHNEIDER-CRIEZIS (1983)) apresentam detalhes construtivos que estão voltados à preocupação de dar continuidade ao isolamento de painel a painel e evitar a formação de pontes térmicas. Como já foi abordado em outras ocasiões, o problema das pontes térmicas não é significativo para o clima do Brasil, de forma que esta preocupação foi abandonada em detrimento de uma maior rigidez e simplicidade nas ligações, onde uma região do isolante é substituída por argamassa de preenchimento.

O surgimento de fissuras nas ligações decorre essencialmente da retração na argamassa de preenchimento. Nas ligações planas, as fissuras geralmente estão restritas à região de contato entre a argamassa de preenchimento e a face do painel. O esforço cortante na ligação constitui causa secundária de formação de fissuras. Com a presença de uma força normal de compressão na ligação, observa-se um acréscimo no valor do cortante em que inicia-se a formação de fissuras.

Em ligações fechadas, devido à maior área de contato entre a argamassa de preenchimento e a superfície do painel, o surgimento de fissuras é bem mais moderado. De maneira geral, o que ocorre são pequenas fissuras ao longo da área de contato entre os painéis. Segundo CEB (1985), estas fissuras não têm efeito considerável sobre o diagrama cortante x deslocamento.

Ainda segundo o CEB (1985), o acréscimo mais acentuado na abertura de fissuras somente ocorre quando os deslocamentos atingem um valor próximo ao correspondente à resistência ao cisalhamento da ligação. Portanto, em ligações planas fechadas, não seria necessário a verificação das condições de utilização da ligação.

6 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

6.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de melhor analisar as propriedades térmicas de painéis sanduíche e suas edificações como um todo, apresentam-se neste capítulo algumas das características térmicas mais importantes dos materiais constituintes de painéis sanduíche. Também será abordado o procedimento de cálculo necessário para quantificação do isolamento térmico dos painéis que se pretende estudar.

Os conceitos e métodos aqui apresentados são apenas superficiais. Na eventualidade de um cálculo mais rigoroso, devido à necessidades construtivas, este deverá ser feito com o auxílio de referências mais específicas (ASHRAE Hanbook of Fundamentals, 1981). O objetivo principal deste capítulo é fornecer apenas noções básicas para avaliação dos painéis unicamente sob o ponto de vista térmico.

Basicamente existem três pontos que merecem ser avaliados em painéis sanduíche :

1. Qual o tipo de conector traria maior prejuízo à eficiência térmica do painel e a quantificação deste prejuízo;
2. Riscos de condensação que um determinado tipo de painel estaria sujeito e a localização desses pontos de condensação;
3. Perda de isolamento térmico ao se utilizar outro tipo de material isolante menos eficiente que as espumas e a relação custo/benefício.

6.2 TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME PERMANENTE E REGIME TRANSITÓRIO

Antes de descrever algumas das propriedades térmicas dos materiais, é preciso chamar a atenção para a diferença entre os regimes de transmissão de calor. Sob o regime permanente, a diferença entre a temperatura externa e interna de um painel é considerada constante ao longo do tempo. Comportando-se desta forma, a temperatura estabiliza-se ao longo da espessura do painel e, em casos de painéis sanduíche, o núcleo central de isolante é responsável por toda a redução no gradiente de temperatura (Figura 65.a).

No regime transitório, a temperatura é variável ao longo de um período do dia, como realmente ocorre na prática. Essas variações ocorridas durante o período não permitem a estabilização da temperatura ao longo da placa do painel (Figura 65.b).

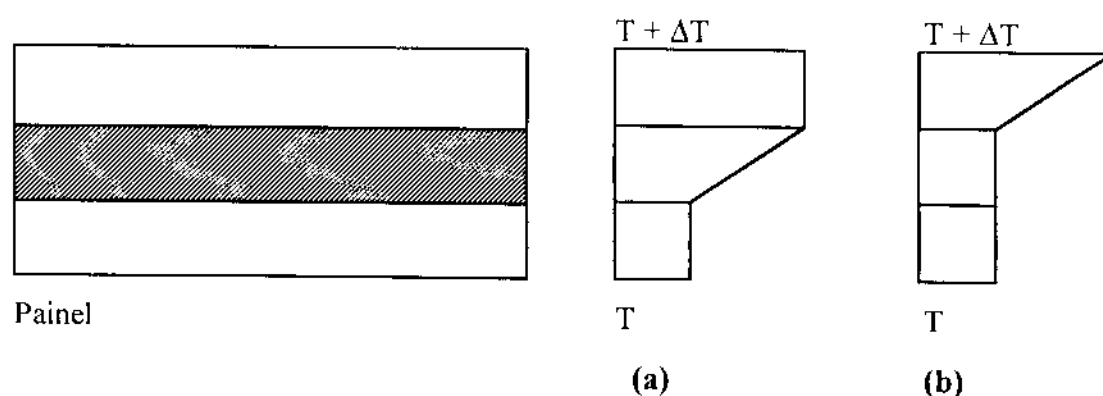


FIGURA 65 – Gradiente de temperatura em painéis sanduíche segundo o regime de transmissão de calor : (a) permanente; (b) transitório. (EINEA et al. ,1991)

Segundo EINEA et al. (1991), Na avaliação dos regimes de transmissão de calor, a exposição direta ao sol (insolação) é mais importante que a distinção propriamente dita de um regime ou outro (sob condições teóricas de cálculo). Em painéis voltados para o sol têm-se observado flechas de grandezas

apreciáveis. Como fatores determinantes, incluem-se aí a cor da superfície do painel e a duração da exposição. Essas condições dificultam a determinação exata da distribuição da temperatura ao longo da espessura do painel.

6.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

6.3.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k)

O coeficiente de condutividade térmica é a principal propriedade térmica de um material específico que precisamos conhecer para calcular as demais características do painel. É definido como “o fluxo de calor que passa por condução, na unidade de tempo, através de uma espessura unitária de um material homogêneo no regime permanente de transmissão de calor, por unidade de área, estabelecendo-se uma diferença unitária de temperatura na direção perpendicular à superfície isotérmica” (BALIK & BARNEY, 1984). A condutividade térmica é expressa em $W.m / m^2 \text{ } ^\circ C$ (Tabela 27).

6.3.2 CONDUTÂNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL (h_e , h_i)

Segundo FROTA & SCHIFFER, (1988), “A condutância térmica superficial engloba as trocas térmicas que se dão à superfície da parede. O coeficiente de condutância térmica superficial expressa as trocas de calor por convecção e radiação.” A resistência térmica superficial é dada pelo inverso da condutância térmica superficial (Tabela 28).

6.3.3 PERMEABILIDADE (P)

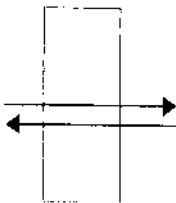
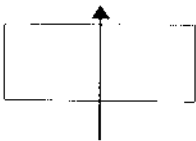
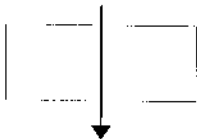
A transmissão da umidade nos materiais é caracterizada por um coeficiente semelhante à condutividade térmica. “A permeabilidade de um material é a quantidade de umidade em gramas por hora e por metro quadrado de superfície de passagem, que atravessa uma parede de 1m de espessura por mm de Hg de diferença de pressão de vapor” (COSTA, 1991). A permeabilidade reflete a capacidade de um material de permitir a passagem do vapor d'água quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor (Tabela 29).

TABELA 27 – Coeficiente de condutividade térmica dos materiais.

MATERIAL	DENSIDADE kg / m ³	Condutividade térmica W.m / m ² °C
ISOLANTES :		
Poliestireno expandido moldado	11 - 30	0,04
Poliestireno expandido extrudado	30 - 28	0,03
Poliuretano isocianureto	35	0,03
Lã de vidro	24 - 96	0,04 - 0,03
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO :		
Argamassa	1600	0,65
Concreto armado	2400	1,75
Concreto comum	2000- 2400	1,28 - 1,74
Concreto com vermiculita	600 - 1400	0,17 - 0,50
Aço	7780	52
Cerâmica	variável	0,46
Telha cerâmica	variável	0,93
Tijolo de 8 furos	1700	0,91
Tijolo comum	1600	0,72
OUTROS :		
Água	1000	0,58
Gesso de placa	750 - 1500	0,35
Papelão	650	0,07

OBS. Os valores para a condutividade térmica (k) podem ser encontrados em diversas referências que tratam especificamente do assunto : (COSTA, 1991, p.70), (FROTA & SCHIFFER, 1988, p.184), (ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1981, p.23.14). É importante salientar que os valores apresentam diferenças significativas, inclusive por motivos de variação da temperatura em que é determinado o valor de k . Os valores apresentados na Tabela 27 são uma compilação dos dados pesquisados.

TABELA 28 – Valores para resistências térmicas superficiais ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$)

posição da superfície e direção do fluxo de calor	superfície interna, $\frac{1}{h_i}$	superfície externa, $\frac{1}{h_e}$	
		parede interna	parede externa
 Parede vertical e fluxo horizontal	0,12	0,12	0,05
 Parede horizontal e fluxo ascendente	0,10	0,09	0,05
 parede horizontal e fluxo descendente	0,17	0,17	0,05

FONTE : FROTA & SCHIFFER, 1988, p.190-91.

TABELA 29 – Valores para a permeabilidade (McCALL, 1988)

Material	Permeabilidade (g.m / m ² h mmHg)
Concreto	0,0023
Poliestireno extrudado	0,0008
Styrofoam	0,0004

6.3.4 RESISTÊNCIA TÉRMICA (R)

Por analogia ao que acontece em eletricidade, podemos introduzir o conceito de resistência térmica para avaliar a capacidade de um dado material em se opor à passagem do fluxo de energia. Para se determinar a resistência térmica de um material homogêneo, divide-se a espessura (e) submetida ao fluxo térmico pela condutividade térmica (k) do material.

Quando tratamos de painéis sanduíche, onde a parede é constituída de várias camadas de materiais diferentes, a resistência térmica é calculada como se fosse uma associação em série de resistências térmicas individuais das camadas. Assim, a resistência térmica total de um painel heterogêneo é dada por :

$$R = \frac{1}{h_e} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + \frac{1}{h_i} \quad (33)$$

Quando uma das camadas do painel não é heterogênea em espessura mas em superfície, a resistência térmica é calculada associando-se em paralelo cada resistência térmica individual dos materiais da superfície, ponderada pela respectiva porcentagem de área ocupada pelo material sobre a área da superfície. Assim, a resistência térmica da camada heterogênea em superfície é dada por :

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2} + \frac{A_n}{R_n}} \quad (34)$$

O método apresentado anteriormente para cálculo da resistência térmica total é aproximado e pode apresentar erros consideráveis, principalmente quando ocorrem pontes térmicas de pequena área mas elevada condutividade térmica em relação aos demais materiais. O ASHRAE Handbook of Fundamentals (1981), apresenta um método, “The zone method”, que permite um cálculo com maior rigor. Na verdade, o ideal seria determinar experimentalmente o valor da resistência térmica total para os painéis deste tipo.

6.3.5 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISSÃO DE CALOR (U)

É definido como “o fluxo de calor que atravessa, na unidade de tempo, a unidade de área do elemento constituído do material, quando se estabelece uma diferença unitária de temperatura entre o ar confinante entre as suas duas faces opostas” (FROTA & SCHIFFER, 1988, p.29). O coeficiente global de transmissão térmica engloba as trocas térmicas superficiais e as trocas térmicas através do material. O coeficiente U quantifica a capacidade do material de ser atravessado por um fluxo de calor induzido por uma diferença de temperatura entre dois ambientes (interno e externo). A unidade é $W / m^2 \text{ } ^\circ C$, é dado pelo inverso da resistência térmica total do painel.

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad (35)$$

EXEMPLOS DE CÁLCULO DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISSÃO DE CALOR PARA DIVERSOS TIPOS DE PAINÉIS :
características do painel :

- placas de concreto com 50 mm de espessura conforme Figura 66
- isolante de poliestireno expandido por extrusão
- conectores de acordo com cada caso

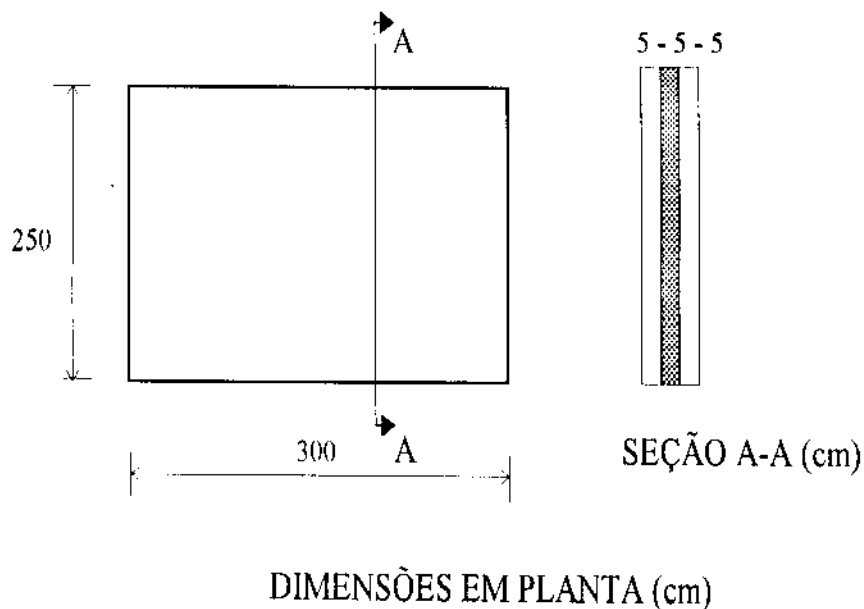


FIGURA 66 – Geometria do painel exemplo

A. PAINEL SEM CONECTORES

elemento do painel	cálculo	Resistência térmica °C . m ² / W
superfície interna	Tabela 28	0,12
placa interna	5 ÷ 175	0,0286
isolante	5 ÷ 3	1,6667
placa externa	5 ÷ 175	0,0286
superfície externa	Tabela 28	0,05
TOTAL		1,8939
U = 0,528 W / m² °C		

B. PAINEL COM CONECTORES DE AÇO

Conectores de aço : 80 ϕ 10 espaçados a cada 30 cm na vertical e na horizontal, cada conector penetra 25 mm em cada placa de concreto.

A resistência térmica do trecho da espessura do painel que é penetrada pelo conector deve ser calculada em série para [concreto + aço] , [isolante + aço] e [concreto + aço]

$$\text{área total} = 75000 \text{ cm}^2$$

$$\text{área de aço} = 80 \times 0,8 = 64 \text{ cm}^2 \Rightarrow 0,08 \% \text{ da área total}$$

$$R (\text{aço}) = 10 \div 5200 = 0,0019$$

$$R (\text{camada heterogênea isolante} + \text{aço}) = \frac{1}{\frac{0,9992}{1,6667} + \frac{0,0008}{0,0019}} = 0,9798$$

$$R (\text{camada heterogênea concreto} + \text{aço}) = \frac{1}{\frac{0,9992}{0,0143} + \frac{0,0008}{0,0019}} = 0,0142$$

$$R (\text{isolante} + \text{concreto}) = 0,9798 + 0,0142 \times 2 = 1,0083$$

elemento do painel	cálculo	Resistência térmica °C . m ² / W
superfície interna	Tabela 28	0,12
placa interna	2,5 ÷ 175	0,0143
isolante	cálculo anterior	1,0083
placa externa	2,5 ÷ 175	0,0143
superfície externa	Tabela 28	0,05
TOTAL		1,2069
U = 0,829 W / m² °C		

C. PAINEL COM NERVURAS NO PERÍMETRO EXTERNO, SEM USO DE CONECTORES METÁLICOS.

Nervuras com 50 mm de espessura.

A resistência térmica da espessura do isolante deve ser calculada inicialmente em paralelo para o conjunto [concreto + isolante].

$$\text{área total} = 75000 \text{ cm}^2$$

$$\text{área de concreto} = 5 \times (2 \times 300 + 2 \times 250) - (4 \times 5 \times 5) = 5400 \text{ cm}^2 \Rightarrow 7,2\%$$

$$R (\text{isolante}) = 1,6667$$

$$R (\text{concreto}) = 0,0286$$

$$R (\text{camada heterogênea concreto} + \text{isolante}) = \frac{1}{\frac{0,928}{1,6667} + \frac{0,072}{0,0286}} = 0,3253$$

elemento do painel	cálculo	Resistência térmica $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$
superfície interna	Tabela 28	0,12
placa interna	$5 \div 175$	0,0286
isolante	cálculo anterior	0,3253
placa externa	$5 \div 175$	0,0286
superfície externa	Tabela 28	0,05
TOTAL		0,5525
$U = 1,810 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$		

D. PAINEL COM NERVURAS NO PERÍMETRO EXTERNO E NO CENTRO, NA HORIZONTAL E NA VERTICAL (dividindo o painel em 4 partes idênticas) SEM USO DE CONECTORES METÁLICOS.

Nervuras com 50 mm de espessura.

A resistência térmica da espessura do isolante deve ser inicialmente calculada em paralelo para o conjunto [concreto + isolante] .

$$\text{área total} = 75000 \text{ cm}^2$$

$$\text{área de concreto} = 5 \times (3 \times 300 + 3 \times 250) - (9 \times 5 \times 5) = 8025 \text{ cm}^2 \Rightarrow 10,7\%$$

$$R (\text{isolante}) = 1,6667$$

$$R (\text{concreto}) = 0,0286$$

$$R (\text{camada heterogênea concreto + isolante}) = \frac{1}{\frac{0,893}{1,6667} + \frac{0,107}{0,0286}} = 0,2338$$

elemento do painel	cálculo	Resistência térmica $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$
superfície interna	Tabela 28	0,12
placa interna	$5 \div 175$	0,0286
isolante	cálculo anterior	0,2338
placa externa	$5 \div 175$	0,0286
superfície externa	Tabela 28	0,05
TOTAL		0,4610
$U = 2,169 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$		

**E. PAINEL COM NERVURAS NO PERÍMETRO EXTERNO,
COM USO DE CONECTORES METÁLICOS.**

Nervuras com 50 mm de espessura.

Conectores de aço : 80 ϕ 10 espaçados a cada 30 cm na vertical e na horizontal
cada conector penetra 25 mm em cada placa de concreto.

A resistência térmica da porção da espessura do painel que é penetrada pelo conector
deve ser calculada em série para [concreto + aço] , [isolante + nervura + aço] ,
[concreto + aço]

$$\text{área total} = 75000 \text{ cm}^2$$

$$\text{área de concreto} = 5 \times (2 \times 300 + 2 \times 250) - (4 \times 5 \times 5) = 5400 \text{ cm}^2 \Rightarrow 7,2 \%$$

$$\text{área de aço} = 80 \times 0,8 = 64 \text{ cm}^2 \Rightarrow 0,08 \% \text{ da área total}$$

$$R(\text{aço}) = 10 \div 5200 = 0,0019$$

$$R(\text{isolante}) = 1,6667$$

$$R(\text{concreto}) = 0,0143$$

$$R(\text{camada heterogênea concreto + aço}) = \frac{1}{\frac{0,9992}{0,0143} + \frac{0,0008}{0,0019}} = 0,0142$$

$$R(\text{camada isolante + nervura + aço}) = \frac{1}{\frac{0,9272}{1,6667} + \frac{0,0008}{0,0019} + \frac{0,072}{0,0143}} = 0,1663$$

$$R(\text{concreto + isolante-nervuras + concreto}) = 0,0142 + 0,1663 + 0,0142 = 0,1947$$

elemento do painel	cálculo	Resistência térmica °C . m ² / W
superfície interna	Tabela 28	0,12
placa interna	2,5 $\div$ 175	0,0143
isolante	cálculo anterior	0,1947
placa externa	2,5 $\div$ 175	0,0143
superfície externa	Tabela 28	0,05
TOTAL		0,3933
U = 2,543 W / m² °C		

**F. PAINEL COM PEQUENOS BLOCOS DE CONCRETO,
SEM USO DE CONECTORES METÁLICOS.**

Blocos de concreto : 42 blocos de 50 x 50 mm espaçados a cada 50 cm na vertical e horizontal com blocos a partir do perímetro externo do painel.

A resistência térmica da espessura do isolante deve ser inicialmente calculada em paralelo para o conjunto [concreto + isolante] .

$$\text{área total} = 75000 \text{ cm}^2$$

$$\text{área de concreto} = 42 \times (5 \times 5) = 1050 \text{ cm}^2 \Rightarrow 1,4 \%$$

$$R (\text{isolante}) = 1,6667$$

$$R (\text{concreto}) = 0,0286$$

$$R (\text{camada heterogênea concreto + isolante}) = \frac{1}{\frac{0,986}{1,6667} + \frac{0,014}{0,0286}} = 0,9250$$

elemento do painel	cálculo	Resistência térmica °C . m ² / W
superfície interna	Tabela 28	0,12
placa interna	5 ÷ 175	0,0286
isolante	cálculo anterior	0,9250
placa externa .	5 ÷ 175	0,0286
superfície externa	Tabela 28	0,05
TOTAL		1,1522

$$U = 0,868 \text{ W / m}^2 \text{ °C}$$

G. RESUMO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES .

Tipo de painel	U (W / m ² °C)
Painel sem conectores / nervuras	0,528
Painel com conectores de aço (0,08 %)	0,829
Painel com nervuras (7,2 %)	1,810
Painel com nervuras (10,7 %)	2,169
Painel com nervuras (7,2%) + conectores	2,543
Painel com blocos (1,4 %)	0,868

1. Observa-se ao utilizar conectores de aço com área de apenas 0,08% da área total, ocorre um acréscimo de 57% no Valor U do painel.
2. Se utilizarmos nervuras de concreto com área de 7,2% do total, o acréscimo no Valor U é da ordem de 250%.
3. Se no painel com nervuras, utilizarmos como complemento 0,08% de conectores, o acréscimo é de 40% sobre o Valor U do painel com nervuras e 382% sobre o Valor U do painel sem qualquer tipo de ligação.
4. Quando aumentamos a quantidade de nervuras de 7,2% para 10,7%, o Valor U sofre um acréscimo de 20%.
5. Se for utilizado blocos de concreto com 1,4% de área, o aumento em relação ao painel sem ligações fica em 65%.
6. Segundo a definição do coeficiente global de transmissão de calor, este apresenta a quantidade de energia em W para manter uma diferença de temperatura através de um painel de uma certa área. Assim, os acréscimos nos valores U refletem diretamente o acréscimo na quantidade de energia para manter as mesmas condições de temperatura em painéis com tipos de conectores diferentes.

6.3.6 GRADIENTE TÉRMICO

É a expressão da variação da temperatura através da espessura do painel partindo-se de uma temperatura interna crescendo ou decrescendo até o valor da temperatura externa (McCALL, 1985).

$$T_n = T_i - (R_{a.s.} / R_{total}) \cdot \Delta T \quad (36)$$

O gradiente térmico é calculado com base no regime permanente de transmissão de calor. Embora esta condição seja improvável de ocorrer na prática, o cálculo geralmente não é feito considerando-se a variação diária de temperatura. Isto deve-se ao fato de que o requinte nos cálculos não melhora a precisão, a níveis significativos, nos casos usuais de variação de temperatura.

EXEMPLO DE CÁLCULO DE GRADIENTE TÉRMICO

Seja o painel do exemplo 6.3.5.A. sujeito a uma temperatura interna de 18 °C e uma temperatura externa de 36 °C. O gradiente térmico é dado por :

$$T_n = 18 - (R_{ac.} / 1,8939) \times (-18)$$

Elemento do painel	Resistência térmica	Resist. t. acumulada	Temperatura (°C)
ar interno	-	-	18,0
superfície interna	0,12	0,12	19,1
placa interna	0,0286	0,1486	19,4
isolante	1,6667	1,8153	35,2
placa externa	0,0286	1,8439	35,5
superfície externa	0,05	1,8939	36,0

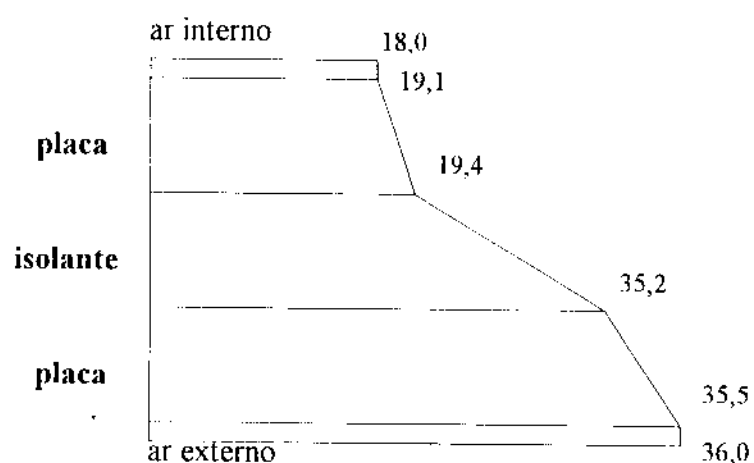


FIGURA 67 – Representação gráfica do gradiente de temperatura.

6.3.7 RESISTÊNCIA À PASSAGEM DO VAPOR (R_v)

Semelhante ao que ocorre na resistência térmica, a resistência à passagem do vapor é dada pela divisão da espessura (e) em metros, pela permeabilidade do material. Alguns materiais utilizados para impermeabilizar e reduzir os riscos de condensação, apresentam valores para a resistência à passagem do vapor em função das camadas que são aplicadas (COSTA, 1991).

TABELA 30 – Resistência à passagem do vapor de materiais impermeabilizantes.

Material	Resistência ($\text{g} / \text{m}^2 \text{ h mm Hg}$)
Pintura a óleo (3 demãos)	25×10^{-6}
Pintura a óleo (2 demãos)	12×10^{-6}
Feltro asfáltico (1,8 a 3 kg/m^2)	38×10^{-6}
Papel impermeável	5500×10^{-6}

6.3.8 GRADIENTE DA PRESSÃO DO VAPOR SATURADO (P_s)

A pressão do vapor saturado é a máxima pressão de vapor que pode ser alcançada sem que ocorra a condensação da umidade do ar. O gradiente da pressão do vapor saturado é obtido a partir do gradiente de temperatura. A cada valor de temperatura, equivale um valor para a pressão do vapor saturado. Segundo COSTA (1991), a pressão de saturação pode ser calculada pela expressão :

$$\log_{ps(\text{mm Hg})} = 9,1466 - \left(\frac{2316}{T(^{\circ}\text{C}) + 273} \right) \quad (37)$$

6.3.9 GRADIENTE DA PRESSÃO DO VAPOR (P_v)

Semelhante ao que ocorre no gradiente térmico, o gradiente da pressão do vapor expressa a sua variação ao longo da espessura do painel. A pressão do vapor na superfície interna ou externa do painel é a pressão do vapor saturado multiplicado pela respectiva umidade relativa. A pressão, P_n , para qualquer ponto no interior do painel é :

$$P_n = P_{vi} - (R_{v.ac} / R_{v.total}) \cdot \Delta V \quad (38)$$

6.4 CONTROLE DA CONDENSAÇÃO

A condensação do vapor d'água ocorre quando este encontra um ponto cuja temperatura está abaixo do seu ponto de orvalho. Uma vez ocorrida a condensação, qualquer acréscimo na umidade relativa simplesmente condensa na superfície fria. Quanto mais fria a temperatura interna ou externa, maior será a pressão do vapor d'água do lado mais quente para atingir o lado frio e seco. Portanto, a deposição da umidade se dá na direção do quente para o frio.

A umidade ou vapor d'água comporta-se como um gás e difunde-se através de todos os materiais de acordo com a sua permeabilidade e pressão diferencial. A condensação pode ocorrer apenas na superfície, no caso de esta ser impermeável, ou pode ocorrer no interior da parede, caso haja porosidade.

A simples passagem da umidade por uma superfície não é danosa. Os problemas ocorrem quando o vapor d'água se condensa na superfície, ou no interior do painel, quando o efeito é mais acentuado devido ao fato de não ser prontamente percebida (BALIK & BARNEY, 1984). A condensação também favorece o desenvolvimento de fungos (KONCZ, 1974).

O controle da condensação é feito por meio da disposição adequada da camada de isolante. Segundo COSTA (1991), quando o material isolante é de grande permeabilidade, a colocação do mesmo no lado quente da parede facilita a condensação, enquanto que a colocação no lado frio, dificulta bastante.

Pode-se também utilizar uma barreira de vapor (disposta no lado mais quente) constituída de uma camada impermeabilizante de tinta ou filme de polietileno entre outros, como relata BALIK & BARNEY (1984).

6.4.1 PONTO DE ORVALHO (T_0)

A temperatura abaixo da qual inicia a condensação do vapor d'água retido pelo ar para um dado valor de umidade e pressão é chamado de ponto de orvalho. Quando o ar com uma certa umidade é resfriado, sua capacidade de reter água é reduzida, aumentando a umidade relativa até a saturação (FROTA & SCHIFFER, 1988, p.54).

TABELA 31 – Ponto de orvalho em °C para pressão de 760 mm de Hg

temperatura ambiente	Umidade relativa (%)									
bulbo seco	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4,5	-21,7	-14,4	-10	-7,2	-4,4	-2,2	-0,6	1,1	2,8	4,5
7,2	-19,4	-12,8	-7,8	-5,0	-2,2	0	2,2	3,9	5,6	7,2
10,0	-18,3	-10,6	-6,1	-2,8	0	2,8	5,0	6,7	8,3	10,0
12,8	-15,0	-8,3	-3,3	0	2,8	5,0	7,2	9,4	11,1	12,8
15,6	-13,9	-6,1	-1,1	2,2	5,6	7,8	10,0	12,2	13,9	15,6
18,3	-11,7	-4,4	0,6	4,4	7,8	10,6	12,8	15	16,7	18,3
21,1	-10,0	-2,8	3,3	7,2	10,6	13,3	15,6	17,2	19,4	21,1
23,9	-8,3	0	5,6	9,4	12,8	15,6	17,8	20,6	22,2	23,9
26,7	-6,1	2,2	7,8	12,2	15,6	18,3	20,6	22,8	25,0	26,7
29,4	-5,0	4,4	10,0	14,4	17,8	21,1	23,3	25,6	27,8	29,4
32,2	-2,8	6,7	12,8	17,2	20,6	23,3	26,1	28,3	29,4	32,2

FONTE : BALIK & BARNEY, 1984

6.4.2 CONTROLE DA CONDENSAÇÃO SUPERFICIAL

Em superfícies com baixa permeabilidade, o vapor d'água não consegue penetrar no interior dos painéis. Entretanto, ainda existe a possibilidade de condensação superficial. Para evitar tal condensação, segundo BALIK & BARNEY (1984) a resistência térmica total (R_{total}) na superfície do painel deve ter um valor mínimo calculado de acordo com as condições de temperatura e umidade do ambiente sujeito à condensação. Assim, para o caso em que a temperatura interna é maior que a externa, e a superfície sujeita à condensação é a interna, temos :

$$R_{total} = \frac{(T_i - T_e)}{(T_i - T_o)} \cdot \frac{1}{h_i} \quad (39)$$

Para o caso em que a temperatura externa é maior que a interna, e a superfície sujeita a condensação é a externa :

$$R_{total} = \frac{(T_e - T_i)}{(T_e - T_o)} \cdot \frac{1}{h_e} \quad (40)$$

6.4.3 CONTROLE DA CONDENSAÇÃO NO INTERIOR DE PAINÉIS

A passagem do vapor d'água através da espessura de um painel precisa ser acompanhada para verificar eventuais riscos de condensação do vapor no interior dos mesmos.

PROCESSO DE CÁLCULO (BALIK & BARNEY, 1984)

- 1º PASSO -** Determina-se o gradiente térmico, eq.(36), e a partir deste, o gradiente da pressão do vapor saturado dado pela eq.(37) ;
- 2º PASSO -** Determina-se as resistências à passagem do vapor dos elementos do painel e, a partir destas, o gradiente da pressão do vapor, eq.(38) ;
- 3º PASSO -** Plota-se o gradiente da pressão do vapor saturado e o gradiente da pressão do vapor em gráfico para determinar a região de condensação : onde a linha do gradiente do vapor cruza a linha do vapor saturado .

EXEMPLO :

Verificar a possibilidade de condensação no interior do painel do exemplo 6.3.5.A quando a temperatura interna for de 18 °C com umidade de 50% e temperatura externa máxima de 36 °C com umidade relativa de 80% .

- 1º PASSO :** A partir do gradiente de temperatura (calculado em 6.3.6), determina-se o gradiente da pressão do vapor saturado (PVS) com a eq.(37) :

Elemento do painel	Temperatura (°C)	PVS (mm Hg)
ar interno	18,0	15,39
superfície interna	19,1	16,62
placa interna	19,4	16,82
isolante	35,2	43,34
placa externa	35,5	44,07
superfície externa	36,0	44,82

- 2º PASSO :** A pressão na superfície interna vale 7,69 mmHg ($0,50 \times 15,39$), e na superfície externa vale 35,86 mmHg ($0,80 \times 44,82$) . A partir desses valores, utilizando a eq.(38), temos :

$$P_n = 7,69 - (R_{v,ac} \div 103,15) \cdot (-28,17):$$

Elemento do painel	Resistência à passagem do vapor	Resistência acumulada	P.V. (mm Hg)
ar interno	-	-	7,69
superfície interna	-	-	7,69
placa interna	21,74	21,74	29,79
isolante	59,67	81,41	34,24
placa externa	21,74	103,15	35,86
superfície externa	-	103,15	35,86

3º PASSO : Os valores plotados em gráfico indicam que há riscos de condensação entre a placa externa e o isolante.

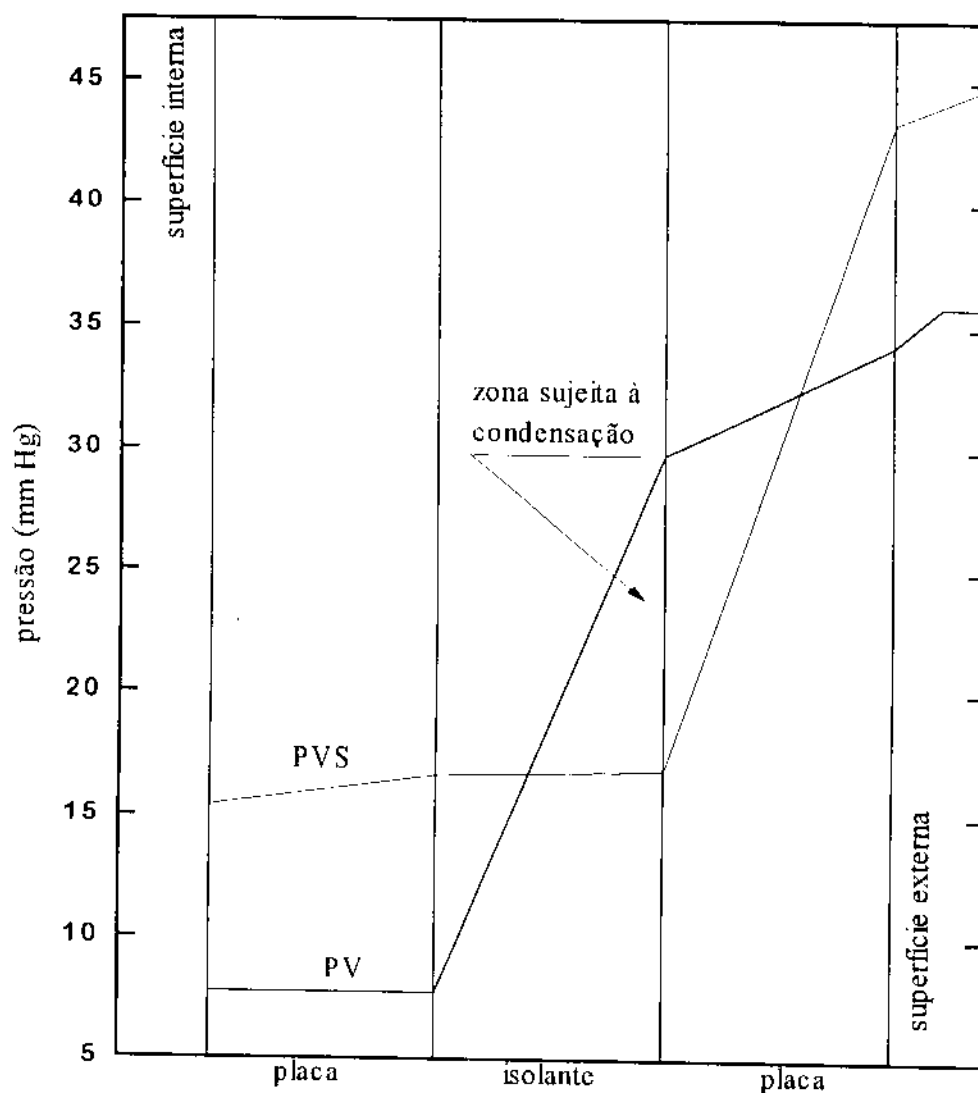


FIGURA 68 – Gradiente de pressões na espessura do painel

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Ao final do desenvolvimento deste trabalho, espera-se ter contribuído para o conhecimento das características dos painéis sanduíche. A partir deste estudo, pretende-se que novas pesquisas sejam desenvolvidas e que os painéis sanduíche venham a ser de uso corrente na Construção Civil no Brasil.

A tipologia dos painéis sanduíche apresentada no Capítulo 2 com certeza proporcionará ao leitor uma visão bem ampla do que é painel sanduíche e seu potencial.

No Capítulo 3, além de algumas diretrizes da Norma brasileira e americana, encontram-se diagramas de interação para cálculo do painel sanduíche na flexão composta. Esses diagramas deverão ser de grande utilidade para o projetista de painéis sanduíche, pois tratam especificamente da seção do painel considerando a presença do núcleo.

Os ensaios descritos no Capítulo 4 constituem rica fonte de resultados práticos e uma orientação específica de onde deverão ser concentrados futuros esforços em pesquisas com painéis sanduíche.

No que se refere às características térmicas, o Capítulo 6 forneceu dados suficientes para o estudo e avaliação dessas características.

Em função do direcionamento dado ao trabalho, buscando-se preparar uma revisão bibliográfica o mais abrangente possível, pode ser que de alguma forma, tenhamos deixado de lado resultados práticos mais específicos. Isto deveu-se à grande

carência ou quase inexistência de dados na bibliografia nacional que exigiu um trabalho de base, para que a partir daí, algumas deficiências pudessem ser apresentadas e despertasse a necessidade de trabalhos específicos.

Com relação aos materiais, a possibilidade de construção de painéis com placas mais delgadas, e portanto mais leves, desperta a necessidade inicial de utilizar um material de granulometria fina na moldagem das placas. Entre os materiais disponíveis, a argamassa armada seria, a princípio, o material mais apropriado para os painéis.

As pesquisas até agora realizadas pelo Grupo de São Carlos na área de tecnologia de argamassa armada demonstraram muitos resultados positivos, principalmente no desenvolvimento de aplicações com pré-moldados delgados (composto por lâminas ou partes de pequena espessura, em geral entre 12 e 40 mm), similar aos painéis sanduíche propostos, e portanto relativamente leves quando comparados ao de concreto armado e mesmo protendido.

No que se refere ao desempenho desse material, houve avanços significativos no conhecimento de suas propriedades, sobretudo quanto à durabilidade e ao comportamento estrutural. Numa revisão dos conceitos e do potencial de aplicação da argamassa armada, o Grupo de São Carlos tem buscado resultados superiores de durabilidade. O aperfeiçoamento da qualidade tem se dirigido rumo ao “microconcreto armado” ou “concreto de granulometria fina” com a adição de fibras curtas de polipropileno. Como consequência, seriam buscados essencialmente resultados superiores de desempenho e durabilidade.

Nesta revisão de conceitos, devem ser perseguidas formas alternativas de produção de peças ainda muito delgadas, porém segundo parâmetros técnicos mais flexíveis.

O microconcreto já é objeto de estudo pelo Grupo de São Carlos em pesquisas atuais. Os resultados iniciais apontam um potencial no uso deste material também em painéis sanduíche. Nesse sentido, poderíamos pensar em painéis de grandes dimensões com placas de pequena espessura e nervuras regularmente espaçadas. Em se tratando de painéis de grandes dimensões, seria apropriado pensar na protensão desses painéis, dependendo é claro, da tecnologia disponível.

Com respeito ao material utilizado como isolante, deve-se buscar alternativas mais baratas para viabilizar a utilização mais ampla dos painéis sanduíche. Seria particularmente interessante buscar soluções utilizando resíduos industriais como matéria-prima para os isolantes. As espumas em geral, são indiscutivelmente mais eficientes do ponto de vista térmico, entretanto o custo ainda é muito elevado, sendo este material responsável por uma parcela significativa no custo total da obra.

O aproveitamento da eficiência térmica dos painéis sanduíche complementada com conceitos de climatização natural apresenta um grande potencial a ser desenvolvido e inserido nos projetos arquitetônicos, em especial nas regiões do Brasil que apresentam temperatura média elevada. Mesmo quando se dispõe de equipamentos para controle da temperatura interna, o uso de painéis sanduíche proporciona economia de energia elétrica, como pôde ser visto nos resultados apresentados no Capítulo 6.

Em pesquisas futuras, é importante que sejam desenvolvidos estudos no sentido de melhor quantificar a composição proporcionada pela aderência do isolante com as placas. Estudos iniciais nesse sentido foram apresentados neste trabalho, mas ainda existe a deficiência de um processo analítico eficiente. A complexidade de interação entre os vários componentes do sistema tem feito com que o estudo de painéis sanduíche seja fundamentado essencialmente em observações experimentais complementadas com cálculo analítico simples. Assim, é essencial que muitos outros estudos experimentais sejam realizados para que se possa chegar a modelos de cálculo mais eficientes e menos dependente de experiência anterior.

Num recente artigo publicado no PCI Journal (EINEA et al., 1994), foi apresentado um interessante sistema de transmissão do cisalhamento entre as placas acompanhado de um estudo experimental e analítico. Este sistema apresentou desempenho térmico bastante eficiente, mantendo-se um comportamento muito próximo ao composto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). *Standard methods of fire test of buildings construction and materials*. ASTM book of standards, ASTM designation E119-76. Philadelphia, 1976.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. *ASHRAE handbook : 1981 Fundamentals*. Atlanta, 1981. cap.23, p.23.1-32.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *MB-1192: Determinação da resistência ao fogo de componentes construtivos estruturais*. Rio de Janeiro, ABNT, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR-6118 : Projeto e execução de obras de concreto armado*. Rio de Janeiro, ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR-7197 : Projeto de estruturas de concreto protendido*. Rio de Janeiro, ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR-9062 : Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado*. Rio de Janeiro, ABNT, 1985.

- BALIK, J.S. ; BARNEY, G.B. Thermal design of precast concrete buildings. *PCI Journal*, v.29, n.6, p.48-98, 1984.
- BALLARIN, A.W. ; HANAI, J.B. Influence of mortar shrinkage on first crack strength of ferrocement. In : Fifth international symposium of ferrocement, Manchester. 1994. *proceedings* .
- BASUNBUL, I.A. ; SALEEM, H. ; AL-SUALAIMANI, G.J. Flexural behavior of ferrocement sandwich panels. *Cement & Concrete Composite*, v.13, n.1, p.21-8, 1991.
- BLJUGER, F.E. *Design of Precast Concrete Structures*. Chichester, ed. John Wiley & Sons, 1988.
- BUSH, T.D. ; STINE, G.L. Flexural behavior of composite precast concrete sandwich panels with continuous truss connectors. *PCI Journal*, v.39, n.2, p.112-21, 1994.
- CHANA, P.S. ; TUNNER, F. H. Sandwich type precast prestressed ferrocement panels for doubly-curved ship hulls. *Journal of Ferrocement*, v.14, n.2, p.143-57, 1984.
- CHANG, W.F. The prototype factory built ferrocement home. *Journal of Ferrocement*, v.13, n.1, p.73-6, 1983.
- CHANG, W.F. ; NANNI, A. Ferrocement factory-built homes. In:SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FERROCEMENT, Bangkok, 1985. *proceedings*.
- COLLINS, F.T. Precast concrete sandwich panels for tilt-up constructions. *Journal of the ACI*, v.26, n.2, p.149-64, 1954.

- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB). *Bulletin d'information n° 169 : Draft guide for the design of precast wall connections*. Rotterdam, 1985.
- COSTA, E.C. *Física aplicada à construção : conforto térmico*. ed. Edgard Blücher Ltda. 1991, cap.6.
- EINEA, A. et al. A new structurally and thermally efficient precast sandwich panel system. *PCI Journal*, v.39, n.4, p.90-101, 1994.
- EINEA, A. et al. State-of-the-art of precast concrete sandwich panels. *PCI Journal*, v.36, n.6, p.78-98, 1991.
- FROTA, A.B. ; SCHIFFER, S.R. *Manual de conforto térmico*. ed. NOBEL, São Paulo, 1988. cap.2.
- HALÁSZ, R.V. ; TANTON, G. *La construcción com grandes elementos prefabricados : cálculo y diseño*. Ediciones URMO, 1972.
- HANAI, J.B. *Construções de argamassa armada : fundamentos tecnológicos para projeto e execução*. São Paulo. ed. PINI, 1992.
- HANAI, J.B. *Construções de argamassa armada : situação, perspectivas e pesquisas*. São Carlos, 1981. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HURD, M.K. Welded wire sandwich panels shotcreted. *Concrete Construction*, v.36, n.12, p.878-80, 1991.
- KONCZ, T. *Manual de la Construcción Prefabricada*. Madrid, ed. Herman Blume Ediciones, 1974. V.I, III.
- LEE, S.L. et al. A study of sandwich wall panels. *Journal of Ferrocement*, v.16, n.3, p.295-313, 1986.

- LEWICKI, B. *Batiments D'habitation Prefabriques en Elements de Grandes Dimensions*, Editions Eyrolles, 1965.
- MACHADO JÚNIOR, E.F. *Casas populares pré-moldadas em argamassa armada - procura de uma solução econômica e confortável*. São Carlos, 1991. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Mc CALL, C.W. Thermal properties of sandwich panels. *Concrete International*, v.7, n.1, p.35-41, 1985.
- NANNI, A. ; CHANG, W.F. Ferrocement sandwich panels under bending and edge-wise compression. *Journal of Ferrocement*, v.16, n.2, p.129-40, 1986.
- NATHAN, N. D. Rational analysis and design of prestressed concrete columns and wall panels. *PCI Journal*, v.30, n.3, p.82-133, 1985.
- NICHOLLS, R. Fabric-reinforced, mortar-faced, foam-core sandwich panels. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, v.117, n.5, p.1356-71, 1991.
- PFEIFER, D.W. ; HANSON, J.A. Precast concrete wall panels : flexural stiffness of sandwich panels. *PCA bulletin D99*, Portland Cement Association. Skokie, p.67-86, 1965.
- PICKARD, S.S. Welded wire sandwich panels : an alternative to wood- frame construction. *Concrete Construction*, v.35 , n.4 , p.363-6. 1990.
- PRECAST / PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE . *PCI Manual for Structural Design of Architectural Precas Concrete*. Chicago, 1977.
- PRECAST / PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. *PCI Design Handbook*. ed.4, Chicago, 1992.

- ROBERTS, S.B. Sandwich wall precast for pulp mill. *Engineering News Record*, v.148, n.8, p.32-4, 1951.
- ROBLES-AUSTRIACO, L. R. et al. Prefabricated ferrocement housing worldwide. *Journal of Ferrocement*, v.13, n.1, p.43-60, 1983.
- ROBLES-AUSTRIACO, L.R. ; SUN, N.C. ; PAMA, R.P. Thermal capability of ferrocement panels. *Journal of Ferrocement*, v.17, n.3, p.241-51, 1987.
- SANTOS, L.M. *Cálculo de concreto armado*. ed. LMS Ltda. São Paulo, 1983. 2v.
- SCHNEIDER-CRIEZIS, S.S. Precast concrete in efficient passive solar design. *PCI Journal*, v.28, n.6, p.68-101, 1983.
- SILVA JÚNIOR, J. F. *Concreto armado (dimensionamento) – flexão normal composta no Estádio III*. edições arquitetura e engenharia. Belo Horizonte, 1971.
- SUN, N.C. ; ROBLES-AUSTRIACO, L. ; PAMA, R.P. Development of a prefabricated ferrocement housing system. In : SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FERROCEMENT, Bangkok, 1985, *Proceedings*.
- TRADOS M. K. et al. Time dependent analysis of composite frames. *Journal of Structural Division*, v.103, n.ST4, p.871-874, 1977.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca. *Diretrizes para Elaboração de Dissertações e Teses na EESC-USP*. São Carlos, 1993
- WANG, M.L. The building system of ferrocement light panel elements. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FERROCEMENT, Bangkok, 1985. *Proceedings*.