

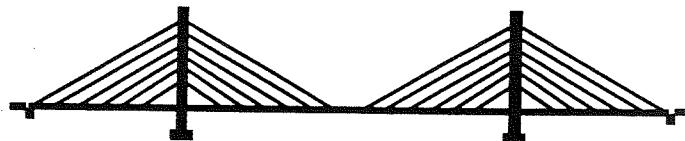
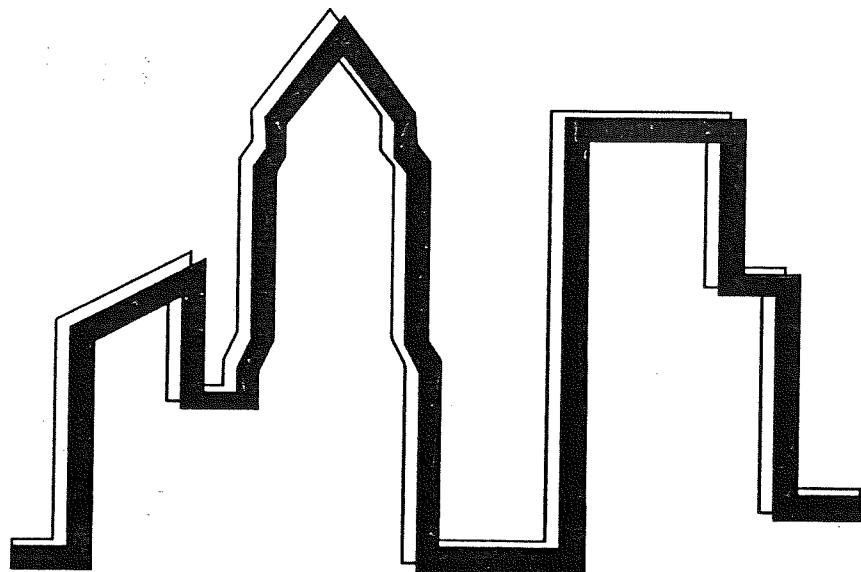
# **II CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**- U.F.J.F. -**

**Juiz de Fora - Maio de 1996.**

# **II CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**



**Juiz de Fora — Maio de 1996**

APOIO  
CIMINAS  
FAPEMIG

# ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PAINÉIS SANDUÍCHE DE FACES DE ARGAMASSA ARMADA E NÚCLEO DE POLIURETANO

BERTINI, Alexandre Araújo <sup>(1)</sup>; MACHADO Jr., Eloy Ferraz <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia de Estruturas pela EESC-USP, São Carlos (SP)

<sup>(2)</sup> Prof. Dr. do Depto. de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, São Carlos (SP)

## RESUMO

Painéis Sanduíche, sem conectores interligando as faces, são analisados quanto ao comportamento à flexão visando obter parâmetros para projeto. A conexão entre as placas de face é feita através da aderência do núcleo, acarretando uma interação parcial entre as faces e proporcionando o "efeito sanduíche". O presente estudo foi desenvolvido para um painel sanduíche estrutural, particular, construído por camadas de argamassa armada e núcleo de espuma rígida de poliuretano expandida entre elas. A estrutura é analisada como sendo constituída de faces grossas, com baixa resistência à flexão, e núcleo fraco (baixa densidade e módulo de deformação transversal da ordem de 4,4 MPa, determinado a partir de ensaios de cisalhamento da espuma). A rigidez ao cisalhamento do núcleo possui valor baixo, causando uma considerável deformação transversal, afetando diretamente a distribuição das tensões normais nas faces devido à flexão da estrutura. São apresentados um estudo comparativo teórico x experimental de flexão em vigas sanduíche, estabelecendo através desta análise um modelo teórico para análise estrutural deste tipo de elemento.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Generalidades

Painéis Sanduíche ficaram mais conhecidos na utilização em estruturas de aviões durante a segunda guerra mundial. Por apresentar características simultâneas de leveza e resistência, este componente foi bastante utilizado para esta finalidade. Mais recentemente tem se verificado uma maior aplicação de estruturas sanduíche como elementos (estruturais ou não estruturais) para construção civil, principalmente empregados em edificações pré-fabricadas.

Uma construção sanduíche compreende, uma combinação de alternativas diferentes, de materiais simples ou compostos, reunidos e intimamente fixados um em relação ao outro, tal que o uso das propriedades de cada material empregado, atribui vantagens estruturais para o conjunto como um todo.

Um tipo simples de sanduíche pode ser visto na fig.1. Consiste de duas faces resistentes separadas por uma camada espessa de um material menos denso e menos resistente que as faces.

O núcleo, assim como as faces, tem funções vitais para o funcionamento do sanduíche. Ele é responsável pela manutenção de uma distância correta entre as faces e também pela transferência de esforços. Os materiais comumente utilizados como núcleo tem pequena resistência à flexão sendo, geralmente, desprezada. O material do núcleo deve ter rigidez suficiente para que resista ao cisalhamento, evitando que as faces escorreguem uma em relação a outra.

SYSNO 0906149  
PROD 000798

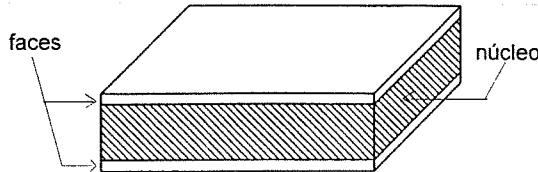


Figura.1. Painel Sanduíche

O núcleo além das funções estruturais que pode exercer, proporciona, conforme a finalidade do emprego do painel, conforto térmico-acústico. Existem certos empregos de painéis sanduíche que aproveitam apenas estas últimas funções, deixando a função estrutural para conectores metálicos ou nervuras, que garantem a composição do sanduíche.

No emprego deste componente na construção civil, os materiais das faces comumente utilizados são a argamassa armada e o concreto armado, podendo ser usado também aço ou alumínio. Como material do núcleo são usualmente empregados espumas rígidas de poliuretano e poliestireno pré-expandidas ou expandidas no local.

## 1.2 Objetivos

Painéis do tipo sanduíche, com faces de argamassa armada, tem atraído particular atenção na produção de componentes pré-moldados para emprego na indústria da construção civil com ênfase em edificações.

As perspectivas do emprego destes componentes, como elementos estruturais e semi-estruturais industrializados são muito grandes, necessitando-se assim um estudo mais elaborado do seu comportamento estrutural.

É objetivo deste trabalho, a análise do comportamento à flexão de painéis sanduíche de faces de argamassa armada e núcleo de espuma rígida de poliuretano expandido, derivado de óleo vegetal. Neste estudo procura-se estabelecer um modelo matemático que exprima o comportamento estrutural do elemento como um todo, levando-se em conta a resistência individual à flexão das faces e a baixa resistência ao cisalhamento do núcleo.

Através de ensaios com vigas sanduíche, convenientemente preparadas, o modelo teórico é adequado ao problema real e a partir daí obtém-se critérios para dimensionamento e verificação.

## 2 ANÁLISE DE VIGAS SANDUÍCHE

### 2.1 Aplicação da Teoria Elementar da Flexão

A viga sanduíche ilustrada na fig. 2 consiste de duas faces de espessura  $t$ , intercalada por um material de baixa densidade (núcleo) e espessura  $c$ .

As três camadas são supostas perfeitamenteaderidas uma a outra e o material das faces é muito mais rígido em relação ao núcleo. Assume-se também que o material das faces e do núcleo são ambos isotrópicos. O painel sanduíche é estudado como uma viga estreita, tal que as tensões na direção  $y$  podem ser consideradas desprezíveis.

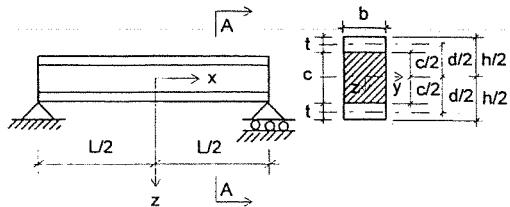


Figura.2. Viga Sanduíche. Característica geométricas.

As tensões e os deslocamento transversais deste tipo de viga podem ser encontrados, numa primeira aproximação, pelo uso da teoria simples da flexão. As seções transversais permanecem planas e perpendiculares ao eixo longitudinal da viga, quando sujeita à flexão.

A viga sanduíche da fig.2 tem como rigidez a soma das rigidezes das duas partes separadas, faces e núcleo, calculadas em relação ao o eixo central da seção inteira, então tem-se:

$$D = E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} . \quad (1)$$

Onde  $E_f$  e  $E_c$  são os módulos de elasticidade das faces e do núcleo respectivamente e  $d$  a distância entre os eixos centrais das faces.

Os primeiros dois termos da expressão (1) representam as rigidezes das faces, associadas com a flexão em torno do eixo central da seção transversal. Destes dois, o primeiro representa a rigidez das faces em relação aos seus próprios eixos centrais. O terceiro termo representa a rigidez à flexão do núcleo.

Na prática o segundo termo é muito maior que os outros dois, podendo portanto, nos casos usuais, serem desprezados.

As tensões nas faces podem ser determinadas pelo uso da teoria simples da flexão, podendo-se escrever:

$$\sigma_f = \frac{Mz}{D} E_f \quad \left( \frac{c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} ; -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{c}{2} \right) \quad (2)$$

Quando o núcleo é fraco para proporcionar uma significativa contribuição para a rigidez à flexão do sanduíche, a tensão de cisalhamento pode ser suposta constante em toda a altura  $c$  do núcleo, sendo dada pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{V}{bd} . \quad (3)$$

## 2.2 Flexão de Vigas Sanduíche com Núcleo Fraco e Faces Finais

Neste caso despreza-se a rigidez à flexão local das faces bem como a rigidez à flexão do núcleo.

As tensões normais nas faces e de cisalhamento no núcleo, podem ser calculadas por meio das expressões da teoria elementar da flexão.

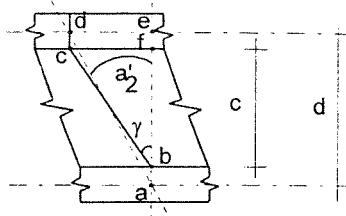


Figura.3. Deformação transversal de uma viga sanduíche

Os deslocamentos podem ser calculados separadamente por superposição dos efeitos do momento fletor e da força cortante. A ação do momento fletor resultará num deslocamento  $a_1$ , que pode ser calculado supondo um núcleo com o módulo de elasticidade transversal ( $G$ ) infinito. A força cortante causará uma deformação transversal no núcleo, conforme fig.3, provocando um deslocamento adicional  $a_2$ .

Observando-se a fig.3 pode-se encontrar uma relação entre  $a'_2$  e a deformação transversal do núcleo ( $\gamma$ ):

$$a'_2 = \frac{da_2}{dx} = g \frac{c}{d} = \frac{V}{Gbd} \frac{c}{d} = \frac{V}{AG} \quad (4)$$

onde:  $A = bd^2 / c$ .

Logo, o deslocamento ao longo do comprimento  $L$  da viga, pode ser facilmente calculado aplicando o princípio dos trabalhos virtuais, através da expressão:

$$a = a_1 + a_2 = \frac{1}{E_f I_f} \int_0^L M \bar{M} dx + \frac{1}{AG} \int_0^L V \bar{V} dx \quad (5)$$

## 2.3 Flexão em Vigas Sanduíche com Núcleos Fracos e Faces Grossas

Neste caso a rigidez à flexão das faces não é desprezada, considerando-se agora o primeiro termo da expressão (1).

A distribuição de tensões normais nas faces, fica representado pela fig. 4.

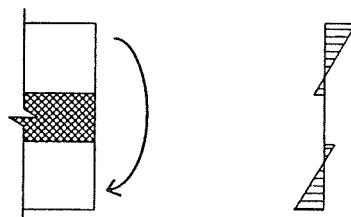


Figura.4. Distribuição de tensões normais para vigas sanduíche.  
Interação parcial entre as faces

A distribuição mostrada na fig.4 é provocada pela deformação transversal do núcleo, fazendo com que as faces absorvam parte desta deformação através de uma flexão em torno de seus próprios eixos.

Podemos analisar este caso superpondo os efeitos, considerando inicialmente um sanduíche com núcleo rígido ( $G = \infty$ ) atuando uma carga  $q_1$  por unidade de comprimento, conforme desenvolvimento de ALLEN (1969). O deslocamento  $a_1$  é calculada de acordo com a teoria simples da flexão. Este deslocamento é associado a um momento fletor  $M_1$  e a uma força cortante  $V_1$ , onde:

$$-V_1 = -bd\tau + EI_f a_1''' \quad (6)$$

$$q_1 = -V_1; \quad V_1 = M_1; \quad M_1 = -Da_1''' \quad (7)$$

A diferenciação é feita em relação a  $x$ , onde  $\tau$  é a tensão cisalhante do núcleo e  $D$  é a rigidez da viga sanduíche, desprezando a rigidez à flexão do núcleo.

A tensão cisalhante  $\tau$ , ocasiona a deformação transversal do núcleo  $\gamma = \tau/G$ , que corresponde a um deslocamento adicional  $a_2$ . As faces devem compartilhar deste outro deslocamento, devendo portanto ser sujeito a uma outra distribuição de carga  $q_2$ , força cortante  $V_2$  e momento fletor  $M_2$ , tal que:

$$q_2 = -V_2; \quad V_2 = M_2; \quad M_2 = -Da_2''' \quad (8)$$

A carga total, força cortante, momento fletor e deslocamento, são agora:

$$\begin{aligned} q &= q_1 + q_2 \\ V &= V_1 + V_2 \\ M &= M_1 + M_2 \\ a &= a_1 + a_2 \end{aligned} \quad (9)$$

Da expressão (4) temos para a tensão cisalhante:

$$\tau = \frac{d}{c} Ga_2' \quad (10)$$

Substituindo na equação (6), tem-se:

$$-V_1 = -AGa_2' + EI_f a_1''' \quad (11)$$

Rearranjando a equação (11) e substituindo  $V_1 = -Da_1'''$ , chega-se:

$$a_2' = -\frac{D}{AG} \left( 1 - \frac{I_f}{I} \right) a_1''' = +\frac{V_1}{AG} \left( 1 - \frac{I_f}{I} \right) \quad (12)$$

A força cortante total é dado por:

$$V = V_1 + V_2 = V_1 - EI_f a_2''' \quad (13)$$

Da equação (12) tira-se  $a_2'''$ , que substituindo em (13) chega-se a equação diferencial dada por:

$$V_1'' - k^2 V_1 = -k^2 V \quad (14)$$

onde,

$$k^2 = \frac{AG}{EI_f \left( 1 - \frac{I_f}{I} \right)} \quad (15)$$

Em qualquer problema em que V é dado em função de x pode-se encontrar  $V_1$ . Os valores de  $M_1$ ,  $a_1$ ,  $q_1$ ,  $M_2$ ,  $a_2$  e  $q_2$  podem ser encontrados por diferenciação e integração. Calculados estes valores, pode-se facilmente determinar as tensões normais nas faces e as tensões cisalhantes no núcleo.

### 3 PREPARAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS

Ensaios de flexão em vigas sanduíches de faces de argamassa armada e núcleo de espuma rígida de poliuretano, foram conduzidos no Laboratório de Estruturas da Escola de engenharia de São Carlos, buscando, a priori, uma investigação do comportamento à flexão deste elemento.

As dimensões dos exemplares foram definidas a partir da espessura total do sanduíche, adotada em função de painéis anteriormente ensaiados por MACHADO Jr. (1990), e das considerações da ASTM 393-62. Foram construídas oito vigas com 55mm de altura, 110mm de largura e 1300mm de comprimento, distribuídas em duas séries, designadas de acordo com o número de camadas de telas, que compreendiam a armadura das faces, da seguinte maneira:

SÉRIE I (PS I): peças de argamassa armada com duas telas EL 126 justapostas, com armaduras desencontradas.

SÉRIE II (PS II): peças de argamassa armada com uma única tela soldada EL 126.

Buscava-se com isso, verificar a influência da armadura no comportamento à flexão do sanduíche.

A argamassa utilizada para moldagem das placas de face, foi preparada na proporção de 1:2,5, em massa, com relação água/cimento de 0,45. O cimento utilizado foi o Cimento Portland Comum (CP 32). A resistência média à compressão e à tração da argamassa, determinada através de ensaios específicos, foi respectivamente de: 35,33MPa e 3,57MPa.

A espessura das faces para todos os modelos foi de 12,5mm e a largura de 110mm, confeccionadas em formas metálicas.

Uma se como material do núcleo espuma rígida de poliuretano derivado de óleo de mamona, i. d. de CFC, produzido pelo laboratório de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química de São Carlos - USP. A espuma tinha uma densidade média de 78g/dm<sup>3</sup> e um módulo de elasticidade transversal médio (G) de 4,4MPa, determinado a partir de ensaios de cisalhamento segundo a ASTM C273-61.

A espessura do núcleo foi de 30mm, expandido entre as faces em uma forma construída especialmente para este fim.

Prevendo a grande flexibilidade das vigas, optou-se por utilizar um pórtico "pendular" para realização dos ensaios.

O carregamento foi aplicado nos terços do vão da viga, segundo o esquema da fig.5, através de um aparato acoplado a um macaco hidráulico, utilizando uma célula de carga de capacidade de 100KN. Foram medidos os deslocamentos no meio do vão e deformações ao longo desta seção, utilizando-se transdutores e extensômetros elétricos ligados a um sistema de aquisição de dados.

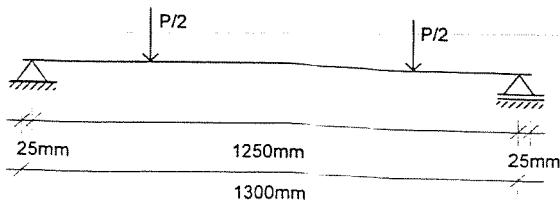


Figura.5. Esquema estático da viga sanduíche.

Os ensaios de flexão foram realizados de forma a atingir a ruptura da viga. Durante os ensaios foram medidas as cargas de primeira fissura e de ruptura para cada modelo.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram ensaiadas à flexão, como já foi dito, duas séries de vigas sanduíche designando-se cada uma por: PS I e PS II. Cada série continha 4 vigas, totalizando 8 (oito) modelos.

As fig.6.a e 6.b mostram as curvas força-deslocamento para os valores médios de cada série ensaiado, confrontando-se as retas teóricas, onde foram consideradas interação total entre as faces, interação parcial (ALLEN), faces finas e nenhuma interação.

As duas retas que mais se aproximaram das curvas experimentais foram as determinadas a partir da consideração de face fina e núcleo fraco e a construída a partir de resultados do programa para análise de cascas e placas de laminados compostos, que utiliza elementos finitos isoparamétricos de 8 e 9 nós desenvolvido por HINTON, E. A. & OWEN, D.R.J. (1984).

A reta traçada a partir das expressões de ALLEN (1969) levando-se em conta faces grossas com rigidez à flexão e núcleo fraco, mostra-se distante das curvas experimentais para as duas séries das vigas sanduíche.

Verifica-se nitidamente, através do gráfico, que a deformação transversal do núcleo faz com que a viga trabalhe entre os dois extremos: interação total ( $G \rightarrow \infty$ ) e nenhuma interação ( $G \rightarrow 0$ ), ou seja, a viga sanduíche tratada aqui possui uma interação parcial entre as faces.

De maneira simples e aproximada pode-se encontrar os deslocamentos para a viga utilizando as considerações expostas no item 2.2 ( faces finas e núcleo fraco), já que os níveis de carregamento correspondente de serviço, atuantes, para a viga em estudo, são inferiores a 400 N.

As tabelas 1 e 2 mostram um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de flexão para cada modelo.

O cálculo teórico do momento de primeira fissura para a viga foi feito seguindo-se as hipóteses propostas pela NBR 6118, levando-se em conta haver interação total entre as faces.

As diferenças percentuais, entre o momento de primeira fissura obtido experimentalmente e o determinado de forma teórica, para cada modelo, apresentados na tabela 1, mostram que as hipóteses utilizadas para o cálculo teórico fornecem boas estimativas para o momento de fissuração.

O momento de ruptura obtido no ensaio, mostrado na tabela 1, é o momento correspondente a carga no instante em que o núcleo atinge a ruína, pois para todos os modelos a ruptura foi caracterizada por cisalhamento da espuma.

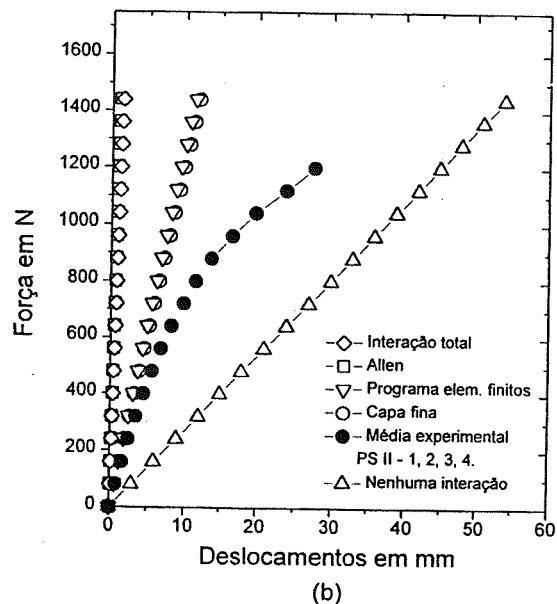
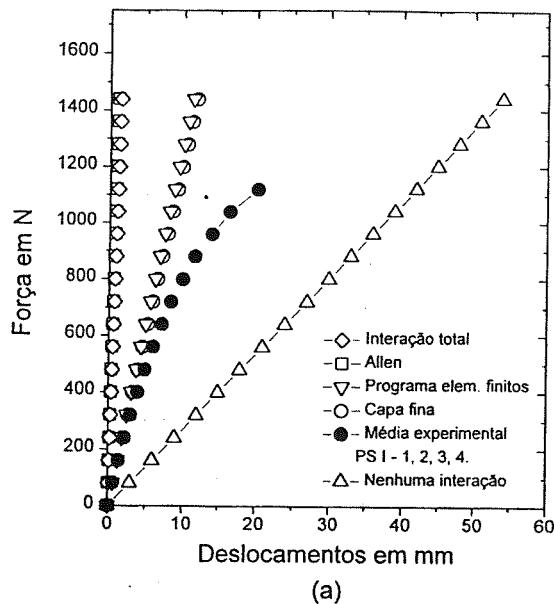


Figura 6. Gráfico Força x Deslocamento comparação teórr. x exper.  
 a) Deslocamentos médios PSI  
 b) Deslocamentos médios PSII

Para a obtenção do momento de ruptura teórico foram considerados as hipóteses de cálculo no estado limite último contidas na NBR 6118, considerando-se ainda que as faces possuem interação total, desprezando qualquer contribuição do núcleo na absorção de tensões normais.

As diferenças percentuais, entre os momentos de ruptura teórico e experimental, apresentados na tabela 1, mostram uma discrepância muito grande entre esses dois valores, isto se deve ao fato, da ruptura da viga ter se dado no núcleo.

TABELA 1. Momentos de fissuração e de ruptura teóricos e experimentais

Painel	Momento de fissuração (kNm)		Diferença (%)	Momento de Ruptura (kNm)		Diferença (%)
	Experimental	Teórico		Experimental	Teórico	
PS I - 1	218,4	161,3	-35,4	268,8	955,9	+71,9
PS I - 2	218,4	161,3	-35,4	235,2	955,9	+75,4
PS I - 3	151,2	161,3	+6,3	336,0	955,9	+64,9
PS I - 4	151,2	161,3	+6,3	336,0	955,9	+64,9
Média	184,8	161,3	-14,5	294,0	955,9	+69,2
PS II - 1	184,8	161,3	-14,5	285,6	554,0	+48,4
PS II - 2	168,0	161,3	-4,1	285,6	554,0	+48,4
PS II - 3	184,8	161,3	-14,5	252,0	554,0	+54,5
PS II - 4	117,6	161,3	+27,2	302,4	554,0	+45,4
Média	163,8	161,3	-1,5	281,4	554,0	+49,2

A magnitude dos deslocamentos do ensaio mostrados na fig.6, bem como, os valores do momento de fissuração e do momento de ruptura, experimentais, mostrados na tabela 1, não mostram uma variação significativa entre as duas séries. Podendo-se dizer que, o aumento de armadura nas faces não melhora o comportamento da viga à flexão, visto que a ruptura se dá na espuma.

Os valores das tensões últimas de cisalhamento no núcleo obtidas no ensaio, mostradas na tabela 2, foram calculadas a partir da expressão (3) para o caso de faces com pequena rigidez e núcleo fraco. A resistência média ao cisalhamento da espuma, foi determinado a partir de ensaios de cisalhamento segundo a norma ASTM C273 - 61.

TABELA 2. Comparação entre a tensão última de cisalhamento do ensaio e a resistência ao cisalhamento da espuma.

Painel	Tensão de Cisalhamento (MPa)		Diferença (%)
	Tensão Última	Resist. ao cisalhamento	
PS I - 1	0,20		+25,9
PS I - 2	0,17		+37,0
PS I - 3	0,24		+11,1
PS I - 4	0,24		+11,1
PS II - 1	0,21		+22,2
PS II - 2	0,21		+22,2
PS II - 3	0,20		+25,9
PS II - 4	0,22		+18,5
Média	0,21	0,27	+22,2

As diferenças entre a resistência ao cisalhamento e a tensão última da espuma, mostram-se, conforme tabela 2, muito próximos, podendo utilizar o primeiro destes valores como um importante parâmetro para dimensionamento e verificação de vigas sanduíches com núcleo fraco solicitadas à flexão.

## 5 CONCLUSÕES

Dos resultados experimentais obtidos na investigação do comportamento à flexão de vigas sanduíche com faces de argamassa armada e núcleo de espuma rígida de poliuretano, pode-se dizer que:

- a) As considerações de núcleo fraco, faces finas (pouca rigidez à flexão), para o cálculo de deslocamentos - partir das expressões do item 2.2, podem ser utilizadas com boa aproximação;
- b) As hipóteses para o cálculo do momento de fissuração segundo a NBR 6118 fornecem bons resultados;
- c) A Resistência ao cisalhamento da espuma rígida determinada a partir do ensaio de cisalhamento é um parâmetro de fundamental importância para o dimensionamento ou verificação de vigas sanduíche. Através deste valor e da geometria da seção, pode-se encontrar o valor da carga admissível atuante, fazendo-se a partir deste valor uma simples verificação das faces fletidas.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, H.G. *Analysis and design of structural sandwich panels*. Oxford, Pergamon, 1969
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (1988). ASTM C273-61 - *Standart test method for shear properties in flatwise plane of flat sandwich constructions or sandwich cores*. Philadelphia, USA
- BALLARIN, A.W. *Propriedades mecânicas da argamassa armada com telas soldadas*. São Carlos, 1989. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos - USP
- BERTINI, A.A., (1995). *Análise do comportamento à flexão de painéis sanduíche com faces de argamassa armada e núcleo de espuma rígida de poliuretano derivado de óleo de mamona*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BERTINI, A.A.; MACHADO Jr., E.F. O painel sanduíche nas obras civis; uma revisão do emprego na construção de habitações. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, 1., Juiz de fora, ago. 1994. *Anais*. Juiz de Fora, FE-UFJF, 1994. v.2, p.77-88
- HINTON, E. & OWEN, D. R. J. *Finite element software for plates and shells*. Pineridge Press, 1984
- GIONGO, J.S. *Argamassa armada: exemplo de cálculo de uma viga calha*. Associação Brasileira de Cimento Portland. Março, 1991
- MACHADO Jr., 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, USP
- PFEIFER, D.W. & HANSON, J.A. *Precast concrete wall panels: flexural stiffness of sandwich panels*. Portland Cement Association