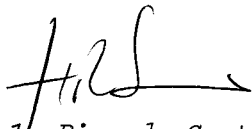
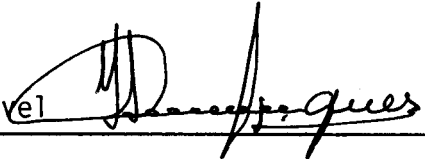
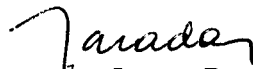


1. Publicação nº <i>INPE-3286-RPI/109</i>	2. Versão	3. Data <i>Set., 1984</i>	5. Distribuição ☒ Interna ☐ Externa ☐ Restrita
4. Origem <i>DMC/DEC</i>	Programa <i>ESTER</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>SATÉLITE DE COLETA DE DADOS</i> <i>ANÁLISE ESTRUTURAL</i> <i>PAINÉIS DO SATÉLITE</i>			
7. C.D.U.: 629.783:629.7.023(81)			
8. Título <i>INPE-3286-RPI/109</i> <i>"ANÁLISE ESTÁTICA DOS PAINÉIS DA ESTRUTURA DO SATÉLITE DE COLETA DE DADOS DA MECB, UM REFINAMENTO"</i>		10. Páginas: 45	
		11. Última página: 37	
9. Autoria <i>Antônio Manoel Dias Henriques</i> <i>Celso Figueiredo Nogueira</i> <i>José Sérgio Rodrigues Alves Filho</i>		12. Revisada por  <i>Hely Ricardo Costa Sávio</i>	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas <i>Neste relatório analisam-se os painéis da estrutura do satélite de coleta de dados da MECB em termos de rigidez e resistência estrutural, utilizando modelos analíticos simplificados. Os resultados apresentados servirão como base para uma avaliação do projeto estrutural global, anteriormente à realização de análises mais refinadas através de métodos numéricos.</i>			
15. Observações			

ABSTRACT

This report analyses the panels of the MECB's data collection satellite structure in terms of structural resistance and stiffness using simplified analytic models. The results presented hereafter will serve as a basis to a first estimate of the global structure design before going through more complex analysis using numerical methods.

•
• •

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	<i>v</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>vii</i>
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DOS PAINÉIS PORTA-EQUIPAMENTOS</u>	3
2.1 - Dimensões do Painei e Características de Materiais	3
2.2 - Carregamento	4
2.3 - Modelagem	8
2.3.1 - Cálculo dos Momentos, Deflexões e Tensões devido a Flexão ..	9
2.3.2 - Cálculo das Deflexões devidas ao Cisalhamento Transversal ..	14
2.4 - Cálculo da Tensão de Cisalhamento Máximo na Colméia	16
2.5 - Cálculo de Cargas Críticas para Falhas Locais	17
<u>CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DOS PAINÉIS LATERAIS</u>	19
3.1 - Dimensões do Painei e Características de Materiais	19
3.2 - Carregamento	20
3.3 - Modelagem	20
3.3.1 - Cálculo dos Momentos, Deflexões e Tensões devido à Flexão e Cisalhamento	21
3.3.2 - Estudo do Comportamento do Painei em Compressão em seu pró prio Plano	23
3.4 - Cálculo de Cargas Críticas para Falhas Locais	24
<u>CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DO PAINEL ANTIGEOCÊNTRICO</u>	27
4.1 - Dimensões do Painei e Características dos Materiais	27
4.2 - Carregamento	27
4.3 - Modelagem	28
4.3.1 - Cálculo dos Momentos, Deflexões e Tensões devido à Flexão ..	28
4.3.2 - Cálculo das Deflexões devidas ao Cisalhamento Transversal .	31
4.4 - Cálculo da Máxima Tensão de Cisalhamento	32
4.5 - Cálculo de Cargas Críticas para Falhas Locais	33
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</u>	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Dimensões do Painei Porta-Equipamentos	3
2.2 - Detalhe das Junções dos Diversos Painéis	7
2.3 - Modelo de Cálculo I	8
2.4 - Modelo de Cálculo II	9
2.5 - Secção de Largura Unitária do Painei	13
2.6 - Detalhe de Junção Painei-Cilindro	18
3.1 - Dimensões do Painei Lateral	19
3.2 - Modelo para o Painei Lateral	21
3.3 - Modelo para o Painei em Compressão	23

LISTA DE SÍMBOLOS

- t_f - espessura da face.
- t_c - espessura da colméia.
- E_f - módulo de elasticidade da face.
- E_c^3 - módulo de elasticidade em compressão, normal ao painel.
- G_L - módulo de cisalhamento longitudinal.
- G_T - módulo de cisalhamento transversal.
- S_{LU} - máxima tensão de cisalhamento na direção longitudinal.
- S_{TU} - máxima tensão de cisalhamento na direção transversal.
- F_{TU} - tensão de ruptura.
- F_{TY} - tensão de escoamento.
- F_{cu}^3 - tensão de compressão máxima, normal ao painel.
- F_{cri} - tensão crítica.
- ρ - densidade.



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Dando continuidade ao estudo da estrutura do satélite de coleta de dados, apresenta-se neste relatório a análise dos painéis da estrutura, agora com a utilização de modelos mais refinados em relação àqueles utilizados no relatório anterior "Dimensionamento Preliminar para Estimativa de Peso e Estudo de Arranjo Físico do Satélite de Coleta de Dados da MECB (Nogueira e Nakagawa, 1984). O modelo de viga para os painéis da estrutura primária é abandonado e substituído por outro modelo, mais real. Através de ferramentas do cálculo racional é feito novo estudo, compatibilizando também espessuras de chapa e colméias, e também a classificação do material com as disponíveis pela EMBRAER, que irá usar, construir e montar os painéis do protótipo.

Ressalta-se também que a configuração da estrutura, nesse estudo, apresenta-se modificada com a retirada do painel geocêntrico não-estrutural e sua substituição por um dos painéis porta-equipamentos, de modo a se obter redução de peso. Tal mudança é comentada na Nota Técnica "Alterações Necessárias para Viabilizar a Fabricação do Modelo de Laboratório do Satélite Coleta de Dados (MECB)" (Alves Filho et alii, 1984).

Todos os cálculos de peso foram feitos considerando duas densidades diferentes de cola. Na necessidade de reduzir o peso da estrutura, será utilizada a cola de menor densidade, o que acarretará maior controle de tolerância de usinagem na fabricação. Caso contrário, a cola utilizada será a de maior densidade que proporciona maior confiabilidade estrutural para os painéis do tipo sanduíche.

Os valores apresentados entre parenteses são referentes à cola mais leve. Para o cálculo das cargas considerou-se o pior caso e utilizaram-se os valores referentes à cola mais pesada.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DOS PAINÉIS PORTA-EQUIPAMENTOS

2.1 - DIMENSÕES DO PAINEL E CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS

As dimensões do painel Porta-equipamentos estão apresentadas na Figura 2.1.

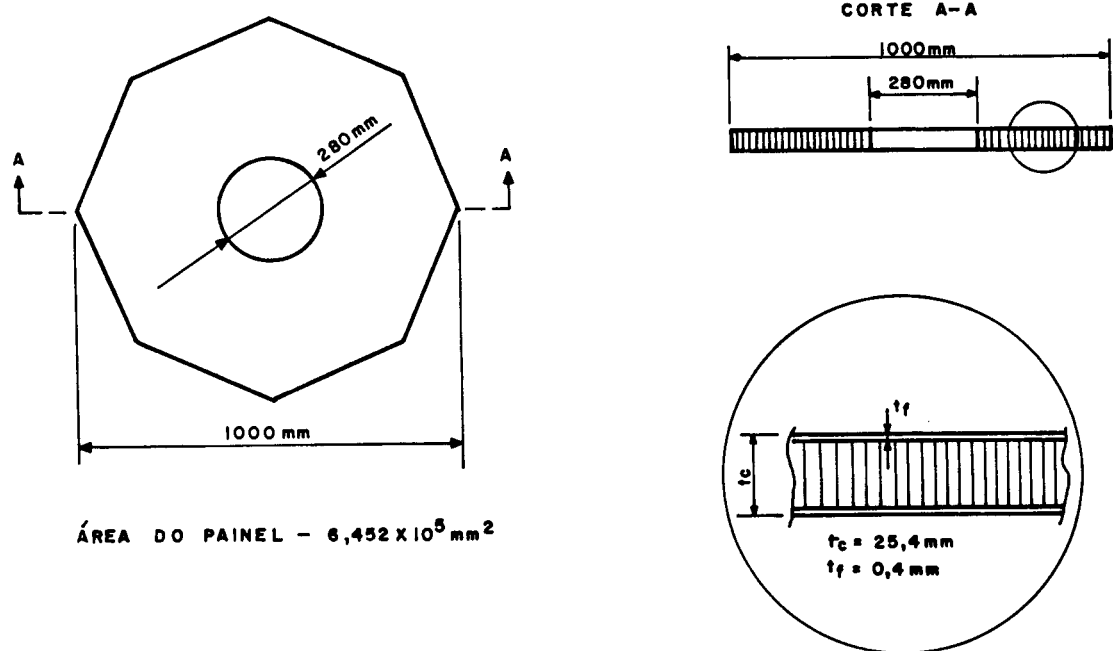


Fig. 2.1 - Dimensões do painel Porta-equipamentos.

As características dos materiais são:

- material das faces: Alumínio 2024 T3,

$$F_{TU} = 482,3 \text{ N/mm}^2,$$

$$F_{TY} = 289,4 \text{ N/mm}^2,$$

$$E = 68.901,5 \text{ N/mm}^2,$$

$$\rho = 2,77 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3;$$

- material do recheio: Colméia de alumínio ⁽¹⁾,

$$CR \text{ III} - 1/4 - 5052 - .001 \text{ N} - 2,3 \pm 10\%,$$

$$F_{CU}^3 = 0,8 \text{ N/mm}^2,$$

$$E_C^3 = 310,1 \text{ N/mm}^2,$$

$$S_{LU} = 0,7 \text{ N/mm}^2,$$

$$S_{TU} = 0,4 \text{ N/mm}^2,$$

$$G_L = 220,5 \text{ N/mm}^2,$$

$$G_T = 111,6 \text{ N/mm}^2;$$

- cola: $\rho_I = 4,15 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^2$ (0,085 psf),

$$\rho_{II} = 2,20 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^2 \text{ (0,045 psf)}.$$

2.2 - CARREGAMENTO

O carregamento a ser aplicado será o das cargas inerciais dos equipamentos e componentes da estrutura do satélite, discriminados a seguir, provocado pela aceleração longitudinal máxima estimada de 20g (g = aceleração da gravidade = 9,8 m/s²).

Tem-se então:

⁽¹⁾ Para o recheio foram tomados os valores mínimos, de acordo com Hexcel (1975).

a) Equipamentos:

- painel central - UPD/C	- 6,0 kg
UPD/D	- 6,0 kg
eletrônica/sensores	- 0,5 kg
UPD	- <u>6,0 kg</u>
Total	- 18,5 kg
- painel geocêntrico - R/TM/TC - "transponder"	- 6,0 kg
Híbrida	- 0,2 kg
Duplexador	- 0,35 kg
R/TM/TC - cod. e decod.	- 3,0 kg
Transmissor PCD	- 4,0 kg
Receptor PCD	- 6,0 kg
Barras magnéticas	- 0,013 kg
Sensor solar	- 0,15 kg
Antena banda s	- <u>0,25 kg</u>
Total	- 19,95 kg

A carga imposta pelos equipamentos será considerada uniformemente distribuída sobre a área do painel, sendo tomado o valor maior entre os dois acima, acrescido de um valor estimado para o peso de parafusos ($\approx 0,2$ kg).

b) Estrutura:

- calculo de peso dos painéis

• painéis porta-equipamentos:

$$\begin{aligned} \text{. peso das faces - } w_F &= 2 \cdot \bar{A}rea \cdot t_f \cdot \rho_f = 2 \times 0,6452 \times \\ &\times 10^4 \cdot 2770 = 1,45 \text{ kg,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{. peso do recheio - } w_C &= \bar{A}rea \cdot t_C \cdot \rho_C = 0,6452 \times 2,54 \cdot \\ &\cdot 10^{-2} \times 36,84 = 0,60 \text{ kg,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{. peso da cola - } w_{CL} &= 2 \cdot \bar{A}rea \cdot c_L = 2 \times 0,6452 \times \\ &\times 0,415(0,22) = 0,54(0,28) \text{ kg} \end{aligned}$$

$$w_p = w_F + w_C + w_{CL} = 2,59(2,33) \text{ kg;}$$

● painel lateral + células solares:

$$\begin{aligned} \text{. peso das faces - } w_F &= 2 \cdot \bar{A} \text{rea} \cdot t_f \cdot \rho = 2 \times 0,2681 \times \\ &\times 4,06 \times 10^{-4} \times 2770 = 0,6 \text{ kg,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{. peso do recheio - } w_C &= \bar{A} \text{rea} \cdot t_C \cdot \rho_C = 0,2681 \times 0,0127 \times \\ &\times 36,84 = 0,125 \text{ kg,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{. peso da cola - } w_{CL} &= 2 \cdot \bar{A} \text{rea} \cdot \rho_{CL} = 2 \cdot 0,2681 \times \\ &\times 0,415(0,22) = 0,22(0,12) \text{ kg,} \end{aligned}$$

$$\text{. peso das células solares - } w_{CS} = 0,571 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} w_{pL} &= 8 (w_F + w_C + w_{CL} + w_{CS}) = 8 [1,52(1,42)] = \\ &= 12,16(11,33) \text{ kg;} \end{aligned}$$

● estimativa do peso das ligações (Figura 2.2):

$$\begin{aligned} \text{. painel porta-equipamento - } w_{p1} &= A_2 \times L \times \rho = \\ &= 200 \times 10^{-6} \times 3,064 \times \\ &\times 2770 = 1,7 \text{ kg,} \end{aligned}$$

onde A_2 = área lateral,

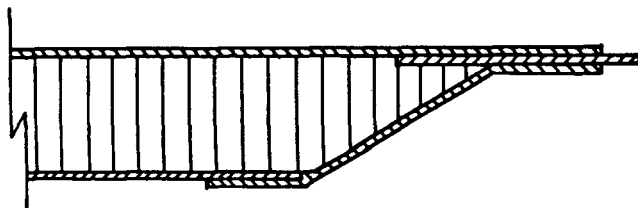
L = comprimento de ligação,

● painéis laterais:

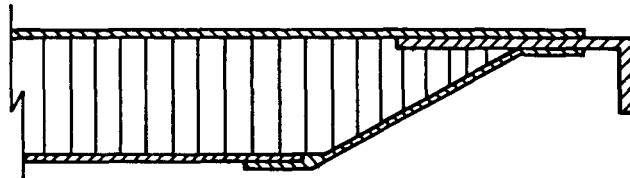
$$\begin{aligned} \text{. painel fixo - } w_{pF} &= (A_1 \times L_1 + A_3 \times L_2) \rho \\ &= (100 + 0,766 + 120 + 1,20) 2770 = \\ &= 0,60 \text{ kg,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{. painel móvel - } w_{pM} &= (A_1 \times L) \cdot \rho \\ &= (100 \times 1,966) \cdot 2770 = 0,53 \text{ kg,} \end{aligned}$$

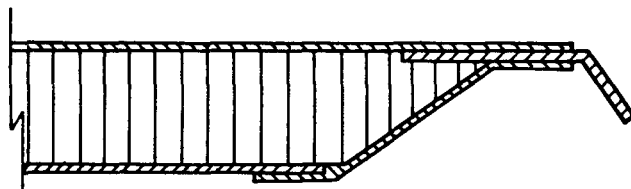
$$w_l = 4(w_{pF} + w_{pM}) = 4,52 \text{ kg.}$$



DETALHE 1
 $A_1 = 100 \text{ mm}^2$

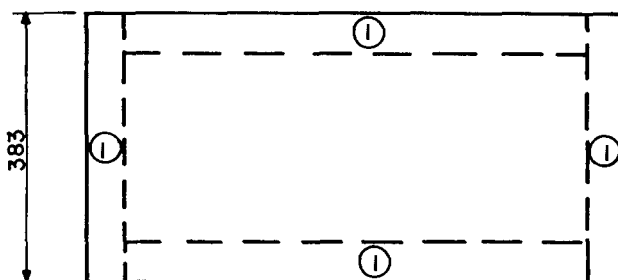


DETALHE 2
 $A_2 = 200 \text{ mm}^2$

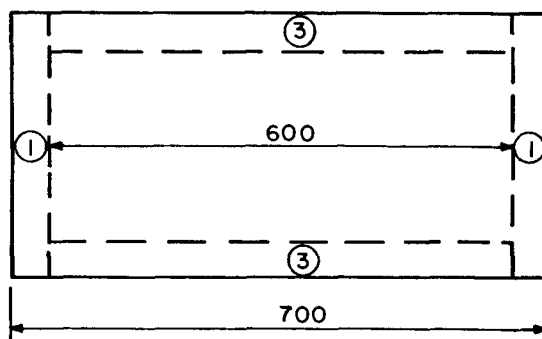


DETALHE 3
 $A_3 = 120 \text{ mm}^2$

(*) A → ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL ESTIMADA



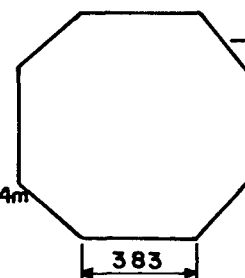
PAINEL LATERAL MÓVEL



PAINEL LATERAL FIXO

PAINEL PORTA EQUIPAMENTO

PERIMETRO=3,064m



→ LIGAÇÕES 2

Fig. 2.2 - Detalhe das junções dos diversos painéis.

A carga imposta pelos painéis laterais será aplicada como distribuída ao longo da extremidade do painel, considerando que metade da carga é suportada por cada painel horizontal. No caso crítico a ser considerado, que é o painel geocêntrico, acrescenta-se ainda a carga aplicada nas extremidades aquela devida aos sensores solares, num total de 4, o que nos fornece 0,6 kg.

2.3 - MODELAGEM

O painel porta-equipamento será modelado como uma placa circular com raio igual ao da circunferência que circunscreve o octógono, engastada no cilindro e livre nas extremidades, sujeita a um carregamento uniformemente distribuído por sua área, acrescido a um distribuído ao longo da extremidade externa.

Considerando o modelo como linear, lança-se mão do princípio da superposição de efeitos que permite a aplicação da carga em duas etapas. Segundo as formulações de Roark (1965), utilizam-se dois modelos: placa circular com carga distribuída pela área e placa circular com carga distribuída no perímetro.

Tem-se então o Modelo I (Figura 2.3) e o Modelo II (Figura 2.4).

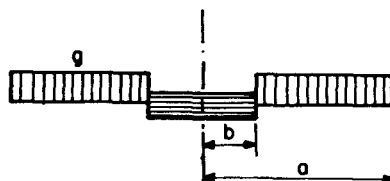


Fig. 2.3 - Modelo de cálculo I.

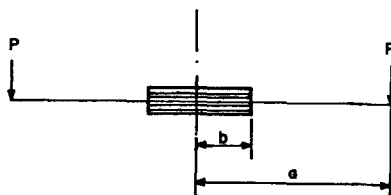


Fig. 2.4 - Modelo de cálculo II.

O resultado, pelo princípio da superposição, será dado pela soma dos resultados obtidos para o Modelo I e Modelo II.

2.3.1 - CÁLCULO DOS MOMENTOS, DEFLEXÕES E TENSÕES DEVIDO À FLEXÃO

a) Modelo I

De acordo com a formulação contida em Roark (1965), tem-se:

- máximo momento radial (extremidade interna):

$$M_{t_b} = \frac{q}{8} \left[\frac{4a^4(m+1)\ln a/b - a^4(m+3) + b^4(m-1) + 4a^2b^2}{a^2(m+1) + b^2(m-1)} \right],$$

onde:

$$m = 1/\nu = 3,33,$$

$$a = 500 \text{ mm (Figura 2.3),}$$

$$b = 140 \text{ mm,}$$

$$\ln a/b = 1,27297,$$

$$e \text{ q} = \text{carga distribuída} = \frac{W \cdot \text{aceleração}}{\bar{\text{área}}},$$

onde W = peso de equipamentos + peso próprio do painel + peso de parafusos = $19,95 + 2,59 + 0,2 = 22,74 \text{ kg}$,

$$\text{aceleração} = 20 \text{ g,}$$

$$\bar{\text{área}} = 6,452 \times 10^5 \text{ mm}^2,$$

$$\text{então } q = 0,0068 \text{ N/mm}^2.$$

Assim, substituindo os valores acima, tem-se:

$$M_{r_b} = 755,6 \text{ N.mm/mm.}$$

-máxima deflexão (extremidade externa):

$$y_a = \frac{-q(m^2 - 1)}{32 m^2 E(tf.tc^2)} \left\{ \frac{a^6(7m+3) - b^6(m-1) - a^4b^2(m+7) - a^2b^4(7m-5) +}{a^2(m+1) +} \right. \\ \left. \frac{-4a^2b^2[a^2(5m-1) + b^2(m+1)]\ln a/b - 16 a^4b^2(m+1)(\ln a/b)^2}{+ b^2(m-1)} \right\}$$

onde:

$$q = 0,0068 \text{ N/mm}^2,$$

$$a = 500 \text{ mm,}$$

$$b = 140 \text{ mm,}$$

$$\ln(a/b) = 1,27297,$$

$$m = 3,33,$$

$$E = 68.901,5 \text{ N/mm}^2,$$

$$t_c = 25,4 \text{ mm},$$

$$t_f = 0,4 \text{ mm}.$$

Substituindo os valores acima tem-se:

$$y_a = 1,54 \text{ mm}.$$

b) Modelo II

De acordo com a formulação contida em Roark (1965), tem-se:

- máximo momento radial (extremidade interna):

$$M_{r_b} = \frac{w}{4\pi} \left[\frac{2a^2(m+1) \ln(a/b) + a^2(m-1) - b^2(m-1)}{a^2(m+1) + b^2(m-1)} \right],$$

onde:

a, b, m, $\ln(a/b)$, são os valores utilizados no item a

e

$$w - \text{carga total} = p \cdot 2\pi a,$$

onde P = carga distribuída na extremidade x aceleração/2 π a,

carga distribuída = (peso dos painéis laterais + células solares)/2 + ligações.

$$W = \left[1,7 + \frac{(12,16 + 4,52)}{2} \right] \cdot 20.9,8 = 1.967,8 \text{ N}.$$

Substituindo os valores apresentados tem-se:

$$M_{r_b} = 457,0 \text{ N.mm/mm}.$$

- máxima deflexão (extremidade externa):

$$y_b = \frac{W(m^2 - 1)}{8m^2 \pi E (t_f t_c^2)} \left[\frac{a^4 (3m+1) - b^4 (m-1) - 2a^2 b^2 (m+1) - 8ma^2 b^2 \ln(a/b)}{a^2 (m+1) +} \right. \\ \left. \frac{-4a^2 b^2 (m+1) (\ln a/b)^2}{+b^2 (m-1)} \right] ;$$

onde:

$a, b, m, \ln(a/b), E, t, t_c$ são os valores utilizados no item a
e

$$w = 1.967,8 \text{ N.}$$

Substituindo os valores acima tem-se:

$$y_b = 1,14 \text{ mm.}$$

c) Modelo I + Modelo II

De acordo com o princípio da superposição, tem-se:

$$M_r = M_{r_a} + M_{r_b} = 1.212,6 \text{ N.mm/mm (momento fletor máximo),}$$

$$y = y_a + y_b = 2,68 \text{ mm (deflexão máxima em flexão).}$$

d) Cálculo da tensão no engastamento:

$$\sigma = \frac{M_r}{W_r} \quad \text{onde } M_r = \text{momento fletor máximo} \\ W_r = \text{módulo de resistência do painel}$$

- Cálculo do módulo de resistência - considerando-se que são as faces do painel que resistem à flexão e que $t_f \ll t_c$,

$$W_r = \frac{I}{y}$$

e

I = momento de inércia da secção de largura unitária,

y = distância da extremidade à linha neutra (Figura 2.5).

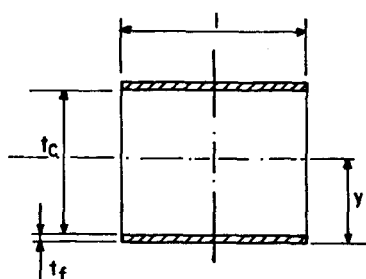


Fig. 2.5 - Secção de largura unitária do painel.

Assim:

$$I = 2 \frac{t_f^3}{12} + 2 t_f \cdot 1 \left(\frac{t_c}{2} + \frac{t_f}{2} \right)^2 = 2 t_f \left(\frac{t_c^2}{4} + \frac{t_c \cdot t_f}{2} + \frac{t_f}{4} \right) = \frac{t_f \cdot t_c^2}{2}$$

onde desprezou-se os termos t_f^3 , $t_c \cdot t_f$ e t_f devido ao fato de que $t_f \ll t_c$.

$$y = \frac{t_c}{2} + t_f = \frac{t_c}{2} \quad (\text{desprezando o valor de } t_f \text{ na soma}),$$

$$\text{então } w_r = \frac{I}{y} = \frac{t_f \cdot t_c^2}{2 \cdot \frac{t_c}{2}} = t_f \cdot t_c ,$$

onde:

$$t_f = 0,406 \text{ mm} ,$$

$$t_c = 25,4 \text{ mm} ,$$

portanto $w_r = 10,3 \text{ mm}^3/\text{mm}$.

Sendo $M_r = 1212,6 \text{ N.mm/mm}$,

tem-se:

$$\sigma = \frac{1212,6}{10,3} = 117,7 \text{ N/mm}^2 .$$

Se $F_{ty} = 289,4 \text{ N/mm}^2$,

tem-se um coeficiente de segurança F.S igual a:

$$F.S = \frac{F_{ty}}{\sigma} = \frac{289,4}{117,0} = 2,46 .$$

2.3.2 - CÁLCULO DAS DEFLEXÕES DEVIDAS AO CISALHAMENTO TRANSVERSAL

Calculam-se agora as deflexões considerando o efeito do cisalhamento; deflexões estas que serão somadas às obtidas anteriormente considerando a flexão, obtendo-se assim a deflexão total do painel. Novamente serão utilizados os dois modelos citados ao início da seção 2.3.

a) Modelo I

De acordo com a formulação contida em Roark (1965), tem-se:

- Máxima deflexão (extremidade externa):

$$y_{sa} = \frac{0,30 w a^2}{t_c G} \left(21n\alpha - 1 + \frac{1}{\alpha^2} \right) ,$$

onde: $w = q = 0,0068 \text{ N/mm}^2$,

$$a = 500 \text{ mm} ,$$

$$t_c = 25,4 \text{ mm} ,$$

$$\alpha = a/b = 3,571 ,$$

$$G_T = 111,6 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$G_L = 220,5 \text{ N/mm}^2 .$$

Substituindo os valores apresentados e utilizando a direção de menor módulo de cisalhamento, que é a transversal, tem-se:

$$y_{sa} = 0,296 \text{ mm} .$$

b) Modelo II

De acordo com a formulação contida em Roark (1965), tem-se:

- máxima deflexão (extremidade externa):

$$y_{sb} = \frac{0,191 \cdot w \cdot \ln \alpha}{t_c \cdot G} ,$$

onde: α , t_c e G_c são os utilizados no item a e

$$W = 1967,8 \text{ N} .$$

Substituindo os valores acima, tem-se:

$$y_{sb} = 0,168 \text{ mm} .$$

c) Modelo I + Modelo II

De acordo com o princípio da superposição, pode-se obter então a deflexão em cisalhamento:

$$y_s = y_{sa} + y_{sb} = 0,464 \text{ mm} .$$

Assim, a deflexão total do painel será obtida pela soma do valor obtido na Seção 2.3.1, item a, com o valor acima. Então:

$$Y_t = y + y_s = 3,14 \text{ mm} .$$

2.4 - CÁLCULO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO MÁXIMO NA COLMÉIA

Com as hipóteses consideradas anteriormente, de que o recheio não contribui para a rigidez em flexão e de que $t_f \ll t_c$, pode-se admitir que a tensão de cisalhamento na colméia é constante ao longo da espessura e é dada pela equação:

$$S = \frac{Q}{t_c} ,$$

onde: Q - força cortante por unidade de comprimento.

A força cortante máxima acontece próxima ao cilindro e é igual a:

$$Q = (q.A + W)/2\pi b, \text{ onde:}$$

$$q = 0,0068 \text{ N/mm}^2 - \text{Seção 2.3.1 - a} ,$$

$$A = \text{área do painel} = 6,452 \times 10^5 \text{ mm}^2 ,$$

$$W = 1967,8 \text{ N} - \text{Seção 2.3.1 - b} ,$$

$$b = 140 \text{ mm} . \text{ Logo:}$$

$$Q = 7,22 \text{ N/mm} ,$$

$$\therefore S = \frac{7,22}{25,4} = 0,28 \text{ N/mm}^2 .$$

Tomando a tensão de cisalhamento máxima como aquela da direção menos resistente da colméia, tem-se:

$$F.S = \frac{S_{TU}}{S} = \frac{0,4}{0,28} = 1,41 .$$

2.5 - CÁLCULO DE CARGAS CRÍTICAS PARA FALHAS LOCAIS

Um elemento estrutural do tipo sanduiche pode falhar por instabilidade local das faces e do recheio, falhas estas conhecidas por flambagem intracelular ("intracell Buckling") e enrugamento de face ("face wrinkling"). Segundo Hexcel (1970), as tensões críticas para estes tipos de falhas são estimadas como se segue:

a) Flambagem intracelular:

$$\frac{F_{cr}}{E_f} = \frac{2}{\lambda} \frac{(t_f)^2}{s}$$

onde: s = tamanho da célula do recheio ("honeycomb"),

$$\lambda = 0,891 ,$$

Substituindo os valores acima obtêm-se: $F_{cr} = 633,7 \text{ N/mm}^2$.

b) Enrugamento de face:

$$\frac{F_{cr}}{E_f} = \frac{0,82}{1 + 0,64 k} \left(\frac{E_c^3 \cdot t_f}{E_f \cdot t_c} \right)^{1/2}$$

$$\text{onde: } k = \frac{F_c^3 \cdot \eta}{F_{cu}^3 \cdot t_c} ,$$

F_c^3 = tensão máxima de compressão do recheio,

η = amplitude total do enrugamento inicial da face = 0,20 - 0,3 mm.

Substituindo os valores acima obtêm-se: $F_{cr} = 125,1 \text{ N/mm}^2$.

Observa-se que, sendo a tensão máxima no engastamento calculada na Seção 2.3.1 de 117 N/mm^2 , tem-se um fator de segurança para o

painel, em relação à falha por flambagem intracelular, de 5,42 e, em relação à falha por enrugamento de face, de 1,07.

Apesar deste último valor ser muito próximo da unidade, ressalta-se aqui que a tensão considerada seria aquela na junção painel-cilindro, não se considerando o detalhe da junção estrutural. Ao se considerar a junção real nota-se que o painel do tipo sanduíche realmente começa a 20-30 mm do cilindro, onde a tensão seria aproximadamente 25% menor, elevando o fator de segurança de 1,07 para 1,42 (Figura 2.6). Adicionalmente, a rotação que o satélite terá, induzirá tensões de tração na face as quais aliviarão a face em compressão. Esta tensão de compressão é estimada em 3 N/mm^2 .

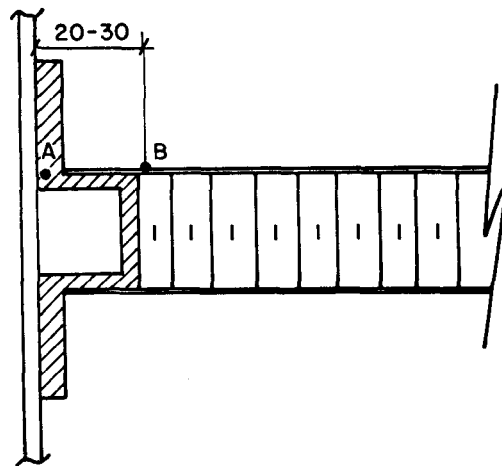


Fig. 2.6 - Detalhe da junção painel-cilindro.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DOS PAINÉIS LATERAIS

3.1 - DIMENSÕES DO PAINEL E CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS

As dimensões dos painéis laterais estão apresentadas na Figura 3.1.

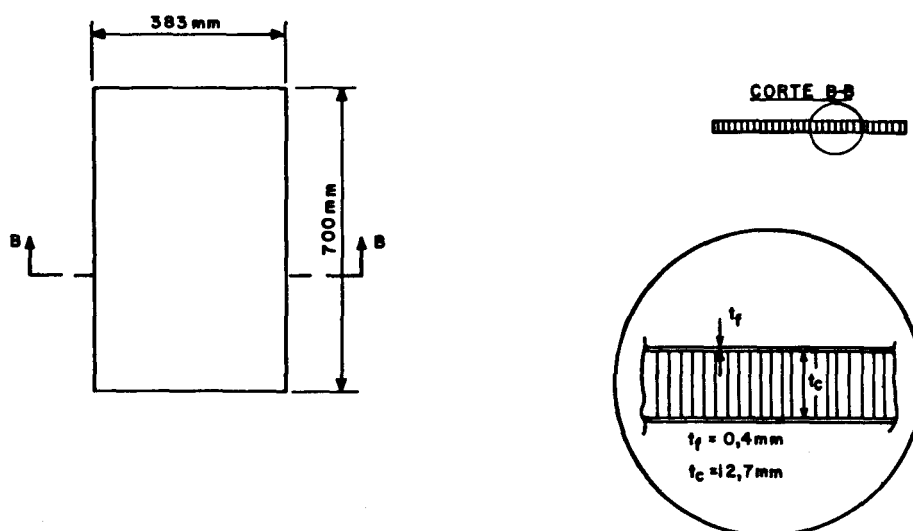


Fig. 3.1 - Dimensões do painel lateral.

As características dos materiais são:

- material das faces Alumínio 2024 T3 (Seção 2.1),

- material do recheio: Colméia de alumínio ⁽²⁾,

CR III - 1/4 - 5052 - 0,001 N - $2,3 \pm 10\%$,

$F_{CU}^3 = 0,8 \text{ N/mm}^2$,

$F_C^3 = 310,1 \text{ N/mm}^2$,

$S_{LU} = 0,7 \text{ N/mm}^2$,

$S_{TU} = 0,4 \text{ N/mm}^2$,

$G_L = 220,5 \text{ N/mm}^2$,

$G_T = 111,6 \text{ N/mm}^2$.

3.2 - CARREGAMENTO

Como componentes da estrutura secundária, os painéis laterais sofrerão carregamento inercial composto de sua inércia própria somada à das células solares, provocada por uma aceleração centrípeta de 18 g devida à rotação do satélite (180 rpm).

Tem-se então, de acordo com os cálculos efetuados na Seção 2.2:

- peso do painel lateral - 0,945 kg ,
- peso das células solares - 0,571 kg ,
- peso total - 1,516 kg .

A carga será considerada distribuída pela área do painel.

3.3 - MODELAGEM

Será utilizado um modelo de placa, simplesmente apoiado em seus quatro lados, sujeito a um carregamento distribuído. Utilizar-se-á para esse modelo o painel móvel por apresentar maior área livre. (Figura 3.2).

⁽²⁾ Para o recheio foram tomados os valores mínimos de acordo com Hexcel (1975).

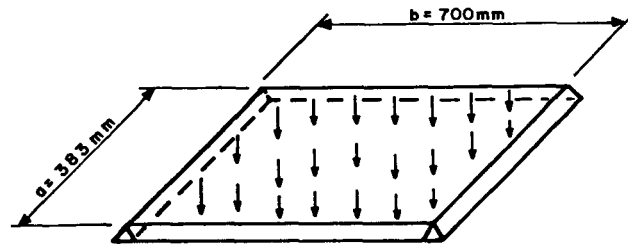


Fig. 3.2 - Modelo para o painel lateral.

3.3.1 - CÁLCULO DOS MOMENTOS, DEFLEXÕES E TENSÕES DEVIDO À FLEXÃO E CILINDRAGEM

De acordo com a formulação contida em Hexcel (1970), tem-se:

- máximo momento fletor:

$$M = \beta \cdot q \cdot a^2 ,$$

onde: $\beta = 0,1$,

$$a = 383 \text{ mm} ,$$

$$q = \text{carga distribuída} = \frac{\text{peso do painel} \cdot \text{aceleração}}{\text{área do painel}} =$$

$$= \frac{1,52 \times 18 \times 9,8}{2,681 \times 10^5} ,$$

$$q = 0,0010 \text{ N/mm}^2 .$$

Substituindo os valores anteriores tem-se:

$$M = 14,67 \text{ N.mm/mm} .$$

- máxima tensão normal na face:

$$\sigma_t = \frac{M}{t_c \cdot t_f} ,$$

$$\text{onde: } t_c = 12,7 \text{ mm} ,$$

$$t_f = 0,406 \text{ mm} ,$$

$$\text{Assim: } \sigma_t = 2,8 \text{ N/mm}^2 .$$

$$\text{Se } F_{ty} = 289,4 \text{ N/mm}^2 ,$$

tem-se um coeficiente de segurança F.S. igual a:

$$F.S. = \frac{F_{ty}}{\sigma_f} = 103 .$$

- máxima tensão de cisalhamento no recheio:

$$S = \frac{2 \cdot \gamma \cdot q \cdot a}{t + t_c}$$

$$\text{onde: } \gamma = 0,499 ,$$

$$t_c = 12,7 \text{ mm} ,$$

$$t = t_c + 2t_f = 13,5 \text{ mm}$$

e q , a são os valores utilizados anteriormente.

$$\text{Assim: } S = 0,0146 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$\text{o que fornece: } F.S. = \frac{S_{TU}}{S} = \frac{0,4}{0,0146} = 27,4$$

- máxima deflexão:

$$y = \alpha_1 \frac{q \cdot a^4}{D} + \alpha_1 \alpha_2 \frac{q a^2 \pi^2}{t_c G_T},$$

onde: $\alpha_1 = 0,0094$,

$\alpha_2 = 1,18$

$G_T = 111,6 \text{ N/mm}^2$,

$$D = \frac{F_c^3 (t_c)^3}{12 \lambda_f} + \frac{E_f}{12 \lambda_f} (t^3 - t_c^3) = 2.756.381,2 \text{ N.mm}$$

e q , a , b , t_c são os valores já utilizados.

Assim: $y = 0,085 \text{ mm}$.

3.3.2 - ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO PAINEL EM COMPRESSÃO EM SEU PRÓPRIO PLANO

Analisa-se agora o painel sujeito a uma carga de compressão em seu próprio plano, considerando a carga distribuída ao longo da extremidade curta (Figura 3.3).

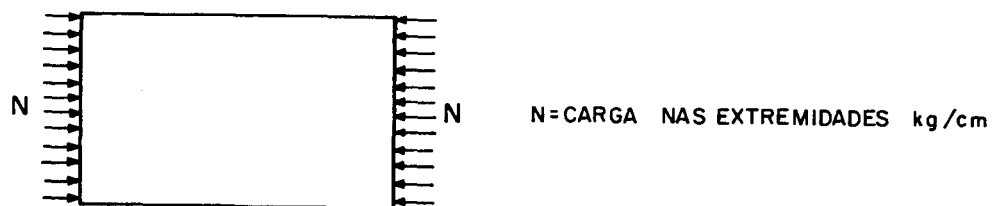


Fig. 3.3 - Modelo para o painel em compressão.

O carregamento será dado pela carga inercial, distribuída linearmente. Então:

$$N = \frac{\text{Peso do painel} \times \text{aceleração}}{\text{comp. do lado curto}} = \frac{1,52 \times 20 \times 9,8}{383} = 0,78 \text{ N/mm} .$$

De acordo com a formulação em Hexcel (1975) tem-se:

- carga crítica de flambagem:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 D}{a^2 + (\pi^2 D / t_c G)} ,$$

onde: D, a, t_c , G_T são os valores utilizados na Seção 3.3.1.

Assim: $P_{cr} = 164 \text{ N/mm}$,

portanto tem-se um coeficiente de segurança igual a:

$$F.S = \frac{P_{cr}}{N} = 210 .$$

3.4 - CÁLCULO DE CARGAS CRÍTICAS PARA FALHAS LOCAIS

Avaliam-se agora as cargas críticas para falhas por instabilidade, considerando a flambagem intracelular e o enrugamento da face. A formulação é obtida de Hexcel (1970).

a) Flambagem intracelular:

$$\frac{F_{cr}}{E_f} = \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{t_f^2}{s} ,$$

onde: $\lambda = 1 - \nu^2 = 0,891$,

$$t_f = 0,406 \text{ mm} ,$$

$$s = 1/4" = 6,35 \text{ mm} ,$$

$$E_f = 68.901,5 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$\text{Assim: } F_{cr} = 632,9 \text{ N/mm}^2 .$$

b) Enrugamento da face:

$$F_{cr} = \frac{0,82}{1 + 0,64 k} \left(\frac{E_c^3 \cdot t_f}{E_f \cdot t_c} \right)^{1/2}$$

$$\text{onde: } E_c^3 = 310,1 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$E_f = 68901,5 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$t_f = 0,406 \text{ mm} ,$$

$$t_c = 12,7 \text{ mm} ,$$

$$k = \frac{E_c \cdot \eta}{F_{cu}^3 \cdot t_c}$$

e $\eta = 0,2 \text{ mm} - 0,3 \text{ mm}$ (Utilizar-se-ã o maior valor, a favor da segurança).

$$F_{cu}^3 = 0,8 \text{ N/mm}^2 .$$

Substituindo os valores acima tem-se: $F_{cr} = 98,9 \text{ N/mm}^2$.

Sendo a tensão máxima no centro do painel, calculada na Seção 3.3.1, igual a $2,8 \text{ N/mm}^2$, tem-se um fator de segurança para o painel em relação à flambagem intracelular de 226 e, em relação à falha por enrugamento da face, de 35.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DO PAINEL ANTIGEOCÊNTRICO

4.1 - DIMENSÕES DO PAINEL E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

As dimensões do painel e características de materiais são as mesmas do painel porta-equipamentos, descrita na Seção 2.1, excetuando-se a espessura do recheio e seu material, que é o mesmo especificado para o painel lateral descrito na Seção 3.1.

4.2 - CARREGAMENTO

O carregamento a ser aplicado será o da carga inercial própria do painel, somada à das células solares, provocada por uma aceleração de 20 g.

Tem-se então:

- peso do painel:

$$\bullet \text{ peso das faces} - 2 \cdot \bar{A}rea \cdot t_f \cdot \rho_t = 2 \times 0,6452 \times 4,06 \times 10^{-4} \times 2770 = 1,45 \text{ kg} ,$$

$$\bullet \text{ peso do recheio} - \bar{A}rea \cdot t_c \cdot \rho_c = 0,6452 \times 1,27 \times 10^{-2} \times 36,84 = 0,30 \text{ kg} ,$$

$$\bullet \text{ peso da cola} - 2 \cdot \bar{A}rea \cdot \rho_{CL} = 2 \times 0,6452 \times 0,415 (0.22) = 0,54(0,28) \text{ kg} ,$$

donde: peso do painel: 2,29(2,03) kg.

- peso das células solares: 1,35 kg.

Total - 3,64(3,38) kg .

Essa carga será considerada distribuída uniformemente sobre a área do painel somada ao peso dos sensores solares, que é de 0,3 kg. Considera-se ainda o carregamento exercido pelo peso das ligações, como distribuído ao longo da extremidade do painel (perímetro), cujo valor é o mesmo calculado para o painel porta-equipamento na Seção 2.2.b e igual a 1,7 kg.

4.3 - MODELAGEM

Os modelos a serem utilizados são os mesmos utilizados na Seção 2.3, sendo os valores dos carregamentos iguais a:

$$q = \text{carga distribuída} = \frac{\text{peso} \times \text{aceleração}}{\text{Área}} = \frac{(3,64+0,3) \times 20 \times 9,8}{6,452 \times 10^5} ,$$

$$q = 0,0012 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$W = \text{carga total} = P \cdot 2\pi a = (1,7 \times 20 \times 9,8) = 333,2 \text{ N} .$$

4.3.1 - CÁLCULO DOS MOMENTOS, DEFLEXÕES E TENSÕES DEVIDO À FLEXÃO

a) Modelo I

De acordo com a formulação contida em Roark (1965) tem-se:

- máximo momento radial (extremidade interna):

$$M_{ra} = \frac{q}{8} \left[\frac{4a^4(m+1)\ln a/b - a^4(m+3) + b^4(m-1) + 4a^2b^2}{a^2(m+1) + b^2(m-1)} \right] ,$$

onde: $m = 1/\nu = 3,33$,

$a = 500 \text{ mm}$,

$b = 140 \text{ mm}$,

$\ln(a/b) = 1,27297$,

$q = 0,0012 \text{ N/mm}^2$.

Substituindo os valores anteriores, tem-se:

$$M_{r_a} = 133,3 \text{ N.mm/mm}.$$

- máxima deflexão (extremidade externa):

$$y_a = \frac{q(m^2-1)}{32m^2 E_f (t_f \cdot t_c^2)} \left\{ \frac{a^6(7m+3) + b^6(m-1) - a^4b^2(m+7) - a^2b^4(7m-5) - a^2(m+1) +}{-4a^2b^2[a^2(5m-1) + b^2(m+1)]\ln(a/b) - 16a^4b^2(m+1)(\ln a/b)^2 + b^2(m-1)} \right\},$$

onde: $q = 0,0012 \text{ N/mm}^2$,
 $a = 500 \text{ mm}$,
 $b = 140 \text{ mm}$,
 $\ln(a/b) = 1,27297$,
 $m = 3,33$,
 $E_f = 68901,5 \text{ N/mm}^2$,
 $t_c = 12,7 \text{ mm}$,
 $t_f = 0,4 \text{ mm}$.

Substituindo os valores acima tem-se: $y_a = 1,09 \text{ mm}$.

b) Modelo II

De acordo com a formulação contida em Roark (1965) tem-se:

- máximo momento radial (extremidade interna):

$$M_{r_b} = \frac{W}{4\pi} \left[\frac{2a^2(m+1)\ln(a/b) + a^2(m-1) - b^2(m-1)}{a^2(m+1) + b^2(m-1)} \right],$$

onde a , b , m , $\ln(a/b)$ são os valores utilizados no item a e $W = 333,2 \text{ N}$.

Substituindo os valores anteriores tem-se:

$$M_{r_b} = 77,4 \text{ N.mm/mm}.$$

- máxima deflexão (extremidade externa):

$$y_b = \frac{-W(m^2-1)}{8m^2 \pi E_f(t_f t_c)} \left[\frac{a^4(3m+1) - b^4(m-1) - 2a^2b^2(m+1) - 8ma^2b^2 \ln(a/b) -}{a^2(m+1) +} \right. \\ \left. \frac{-4a^2b^2(m+1)(\ln a/b)^2}{+ b^2(m-1)} \right]$$

onde a , b , m , $\ln(a/b)$, E , t_f , t_c , são os valores utilizados no item a e $W = 333,2 \text{ N}$.

Substituindo os valores acima tem-se: $y_b = 0,78 \text{ mm}$.

c) Modelo I + Modelo II

De acordo com o princípio da superposição, tem-se:

$$M_r = M_{r_a} = M_{r_b} = 210,7 \text{ N.mm/mm} \text{ (Momento Fletor Máximo)},$$

$$y = y_a + y_b = 1,87 \text{ mm} \text{ (Deflexão Máxima em Flexão)},$$

d) cálculo da tensão no engastamento:

$$\sigma = \frac{M_r}{W_R},$$

onde $W_R = t_c \cdot t_f = 5,1562 \text{ mm}^3/\text{mm}$,

$$\sigma = \frac{210,7}{5,1562} = 40,9 \text{ N/mm}^2.$$

Se $F_{ty} = 289,4$, N/mm²

tem-se um coeficiente de segurança F.S. igual a:

$$F.S. = \frac{F_{ty}}{\sigma} = 7,1 .$$

4.3.2 - CÁLCULO DAS DEFLEXÕES DEVIDAS AO CISALHAMENTO TRANSVERSAL

Calculam-se agora as deflexões, considerando o efeito de cisalhamento, as quais serão somadas às obtidas anteriormente considerando a flexão, obtendo-se assim a deflexão total do painel. Novamente serão utilizados os dois modelos da Seção 2.3.

a) Modelo I:

De acordo com a formulação contida em Roark (1965) tem-se:

- máxima deflexão (extremidade externa):

$$y_{sa} = \frac{0.30 \ q \ a^2}{t_c \ G_T} \left(2.1 \ln \alpha - 1 + \frac{1}{\alpha^2} \right) ,$$

onde $\alpha = a/b$,

a , b , t_c , q são os valores utilizados na Seção 4.3.1

e $G_T = 111,6$ N/mm² .

Substituindo dos valores apresentados tem-se: $y_{sa} = 0,10$ mm.

b) Modelo II

De acordo com a formulação contida em Roark (1965) tem-se:

- máxima deflexão (extremidade externa):

$$y_{sb} = \frac{0,191 \cdot W \cdot \ln \alpha}{t_c \cdot G_T},$$

onde: α , t_c e G_T são os valores utilizados no item a e $W = 333,2$ N.

Substituindo os valores anteriores tem-se: $y_{sb} = 0,06$ mm.

c) Modelo I + Modelo II:

De acordo com o princípio da superposição, pode-se obter então a deflexão em cisalhamento:

$$y_s = y_{sa} + y_{sb} = 0,16 \text{ mm}.$$

Assim, a deflexão total do painel será obtida pela soma do valor obtido na Seção 4.3.1, item c, com o valor acima. Então:

$$y_T = y + y_s = 2,03 \text{ mm}.$$

Nota-se que a deflexão do painel porta-equipamentos é maior que a do painel antigeocêntrico. Sendo assim, o painel antigeocêntrico, estando solidário aos painéis laterais, terá um acréscimo de carga aliviando um pouco os painéis porta-equipamentos. Tal influência deverá ser avaliada num cálculo mais refinado usando métodos numéricos.

4.4 - CÁLCULO DA MÁXIMA TENSÃO DE CISALHAMENTO

De acordo com a Seção 2.4, a tensão de cisalhamento na colmeia pode ser calculada por:

$$s = \frac{Q}{t_c}.$$

Para o caso do painel antigeocêntrico:

$$Q = (q.A + W)/2\pi b = (0,0012 \times 6,452 \times 10^5 + 333,2)/2\pi \times 140 =$$

$$Q = 1,26 \text{ N/mm} .$$

$$\therefore S = \frac{1,26}{12,7} = 0,099 \text{ N/mm}^2 ,$$

o que fornece um fator de segurança igual a:

$$F.S = \frac{S_{TU}}{S} = \frac{0,40}{0,099} = 4$$

4.5 - CÁLCULO DE CARGAS CRÍTICAS PARA FALHAS LOCAIS

As cargas críticas para falhas por instabilidade, considerando-se a flambagem intracelular e enrugamento da face, são as mesmas calculadas para os painéis laterais, dado que a colmeia utilizada para o recheio do painel antigeocêntrico é a mesma utilizada para o painel lateral, bem como o material da face (Seção 3.5). Assim, tem-se:

- carga crítica para flambagem intracelular: $F_{CR} = 632,9 \text{ N/mm}^2$,
- carga crítica para enrugamento da face: $F_{CR} = 98,9 \text{ N/mm}^2$.

Sendo a tensão máxima no engastamento, calculada na Seção 4.3.1, igual a $40,9 \text{ N/mm}^2$, tem-se um fator de segurança para o painel, em relação à falha por flambagem intracelular, de 15,5 e, em relação à falha por enrugamento da face, de 2,4. Verifica-se a existência de boa margem de segurança que é ampliada ao se levar em conta as observações feitas na Seção 2.4.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Com base nos cálculos mostrados nos capítulos anteriores conclui-se que:

- Os painéis porta-equipamentos serão projetados tendo como falha crítica ($FS = 1,07$) o enrugamento da face inferior próxima à junção com o cilindro. Sendo esta uma falha bastante localizada, poderá ser solucionada, se necessário, com o aumento local da espessura da face.
- Os painéis laterais apresentam coeficientes de segurança altos para todos os tipos de falha, sendo que a falha mais crítica seria por cisalhamento do recheio ($FS = 27,4$). Dessa forma, se a deformação máxima exigida para as células solares não tiver sido ultrapassada, poder-se-ão otimizar as dimensões destes painéis.
- O painel antigeocêntrico apresentou, como os painéis porta-equipamentos, o menor coeficiente de segurança para a falha por enrugamento da face inferior junto à junção com o cilindro ($FS=2,4$). Como a carga dos painéis laterais foi considerada nesta análise como suportada apenas pelos painéis porta-equipamentos e devido ao fato de as deflexões calculadas para os painéis porta-equipamentos e para o painel antigeocêntrico serem diferentes, espera-se que na realidade alguma carga dos painéis laterais seja suportada pelo painel antigeocêntrico, o que diminuiria o coeficiente de segurança calculado. Este problema será esclarecido com a realização de análises numéricas posteriores, as quais incluirão a interferência estrutural entre os vários painéis.

Com relação ao relatório INPE-3059-RPI/094 - "Dimensionamento Preliminar Para Estimativa de Peso e Estudo de Arranjo Físico do Satélite de Coleta de Dados da MECB" (Nogueira e Nakawa, 1984) - poucas

comparações poderão ser feitas devido à grande diferença entre os modelos e carregamentos considerados. Os painéis laterais são os únicos que apresentam semelhança de modelagem nos dois relatórios, sendo que para eles os resultados são concordantes com diferenças principalmente no peso, já que neste relatório estima-se o peso de junções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES FILHO, J.R.S.; ARAÚJO, E.R.; HENRIQUES, A.M.D.; NOGUEIRA, C.F.; SAVIO, H.R.C. *Alterações necessárias para viabilizar a fabricação do modelo de laboratório do satélite de coleta de dados da MECB.* São José dos Campos, INPE 1984. (Nota Técnica).
- HEXCEL. *Mechanical properties of hexcel honeycomb materials.* California 1975. (Technical Service Bulletin 120).
- NOGUEIRA, C.F.; NAKAGAWA, N.M. *Dimensionamento preliminar para estimativa de peso e estudo de arranjo físico do Satélite de Coleta de Dados da MECB.* São José dos Campos, INPE, 1984. (INPE-3059-RPI/094).
- ROARK, R.J. *Formulas by stress and strain.* 5.ed. New York, McGraw-Hill, 1965.