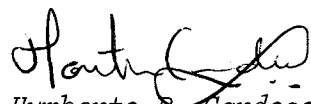
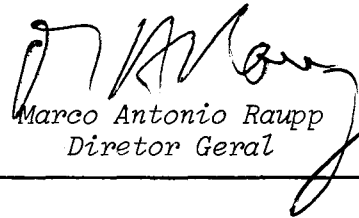


1. Publicação nº <i>INPE-4443-RPI/190</i>	2. Versão	3. Data <i>Dez. 1987</i>	5. Distribuição <input checked="" type="checkbox"/> Interna <input type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC-6300</i>	Programa <i>A8A - 508454</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>SIMULADOR TERRESTRE</i> <i>MODELAGEM TÉRMICA</i> <i>TRANSFERÊNCIA DE CALOR</i> <i>MEDIÇÕES DE TEMPERATURA</i>			
7. C.D.U.: <i>681.586</i>			
8. Título <i>INPE-4443-RPI/190</i>  <i>SIMULADOR TERRESTRE - COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS TEÓRICOS E ENSAIOS</i>		10. Páginas: <i>31</i>	
		11. Última página: <i>19</i>	
		12. Revisada por	
9. Autoria <i>Ismael Emílio de Oliveira Junior</i> <i>Márcia Barbosa Henriques Mantelli</i>		 <i>Humberto P. Cardoso</i>	
Assinatura responsável <i>Ismael E. de Oliveira Jr.</i>		13. Autorizada por  <i>Marco Antonio Raupp</i> Diretor Geral	
14. Resumo/Notas  <p><i>Este trabalho tem por objetivo determinar um método matemático para o cálculo da distribuição de temperaturas em um simulador terrestre. A qualificação deste método é conseguida através da comparação entre valores estimados pelo modelo e resultados de ensaios realizados com um simulador real. A implementação do modelo é efetuada por meio de um programa de computador disponível.</i></p>			
15. Observações			

#### ABSTRACT

*This work has the objective of determining a mathematical method for the calculation of temperature distribution in an earth simulator. The qualification of this method is obtained by means of a comparison between values estimated by the model and results obtained from tests made with a real simulator. The model implementation is done by an available computer program.*



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	<i>v</i>
LISTA DE TABELAS .....	<i>vii</i>
LISTA DE SÍMBOLOS .....	<i>ix</i>
1 - <u>INTRODUÇÃO</u> .....	1
2 - <u>ENSAIOS REALIZADOS</u> .....	3
3 - <u>MODELO TEÓRICO</u> .....	5
3.1 - Cálculo da condutibilidade térmica equivalente da camada de isolante	9
3.2 - Cálculo da resistência térmica entre camadas .....	11
3.2.1 - Cálculo das áreas dos nós .....	13
3.3 - Cálculo da resistência térmica entre nós da mesma camada .....	14
4 - <u>ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES</u> .....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	19



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Esquema do simulador terrestre .....	1
2 - Vista esquemática da camada B .....	2
3 - Localização dos pontos para medição de temperatura .....	3
4 - Setor da placa utilizada na modelagem e suas camadas .....	9
5 - Resistência térmica entre camadas .....	11
6 - Numeração dos nós da camada 1 .....	13



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Dados dos ensaios .....	4
2 - Áreas dos n̄os e largura das fronteiras da camada 1 .....	14
3 - Comparação entre ensaios e modelo .....	16
4 - Fator de erro $\epsilon_t$ nos pontos .....	17





### LISTA DE SÍMBOLOS

- $A$  - área,  $m^2$  ;
- $A_1$  - área de lâ de vidro,  $m^2$  ;
- $A_n$  - área da fronteira entre nós correspondentes de camadas adjacentes,  $m^2$  ;
- $A_p$  - área total dos parafusos,  $m^2$  ;
- $c_p$  - calor específico a pressão constante do ar,  $J/kg.K$  ;
- $e_a$  - espessura do material A, m ;
- $e_b$  - espessura do material B, m ;
- $g$  - aceleração da gravidade,  $m/s^2$  ;
- $Gr_L$  - número adimensional de Grashof ;
- $h_c$  - coeficiente de película,  $W/m^2.K$  ;
- $k$  - condutibilidade térmica,  $W/m.K$  ;
- $k_a$  - condutibilidade térmica do material A,  $W/m.K$  ;
- $k_{al}$  - condutibilidade térmica do alumínio,  $W/m.K$  ;
- $k_{ar}$  - condutibilidade térmica do ar,  $W/m.K$  ;
- $k_b$  - condutibilidade térmica do material B,  $W/m.K$  ;
- $k_{eq}$  - condutibilidade térmica equivalente,  $W/m.K$  ;
- $k_1$  - condutibilidade térmica de lâ de vidro,  $W/m.K$  ;
- $k_p$  - condutibilidade térmica do material dos parafusos,  $W/m.K$  ;
- $L$  - comprimento equivalente da placa, m ;
- $L_1$  - comprimento da camada de lâ de vidro, m ;
- $P_r$  - número adimensional de Prandtl ;

- $Q_{cd}$  - calor trocado por condução, J ;
- $Q_{cv}$  - calor trocado por convecção, J ;
- $Q_r$  - calor trocado por radiação, J ;
- $R_{ab}$  - resistência térmica entre os materiais A e B, K/W ;
- $R_{eq}$  - resistência térmica equivalente, K/W ;
- $R_{ij}$  - resistência térmica entre os nós i e j, K/W ;
- $R_l$  - resistência térmica de lâ de vidro, K/W ;
- $R_p$  - resistência térmica dos parafusos, K/W ;
- $R_{12}$  - resistência térmica entre as camadas 1 e 2, K/W ;
- $R_{34}$  - resistência térmica entre as camadas 3 e 4, K/W ;
- $T$  - temperatura, K ;
- $T_s$  - temperatura da superfície da placa, K ;
- $T_\infty$  - temperatura do meio ambiente, K ;
- $x$  - distância na direção do fluxo de calor, m ;
- $\beta$  - coeficiente de expansão térmica,  $K^{-1}$  ;
- $\varepsilon_t$  - erro no cálculo da temperatura, % ;
- $\sigma$  - constante de Stephan-Boltzmann,  $\sigma = 5,667 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2 \cdot K^4$  ;
- $\mu$  - viscosidade do ar, N.s/m<sup>2</sup> ;
- $\rho$  - massa específica do ar, kg/m<sup>3</sup> ;

## 1 - INTRODUÇÃO

Um simulador terrestre é um equipamento utilizado para testar sensores de horizonte. Estes sensores são instalados em satélites e têm a função de determinar a posição destes em relação à Terra. O simulador terrestre faz, para o sensor, o papel do planeta em termos de emissão de radiação infravermelha.

O objetivo deste trabalho é comparar as temperaturas obtidas em um ensaio feito com um simulador terrestre com os resultados fornecidos por um modelo matemático. Desta forma, pode-se aferir o modelo e utilizá-lo para o projeto e análise de outros simuladores terrestres com dimensões diferentes.

O simulador analisado encontra-se no laboratório do Departamento de Mecânica Espacial e Controle do INPE e compõe-se de quatro camadas, conforme mostra a Figura 1.

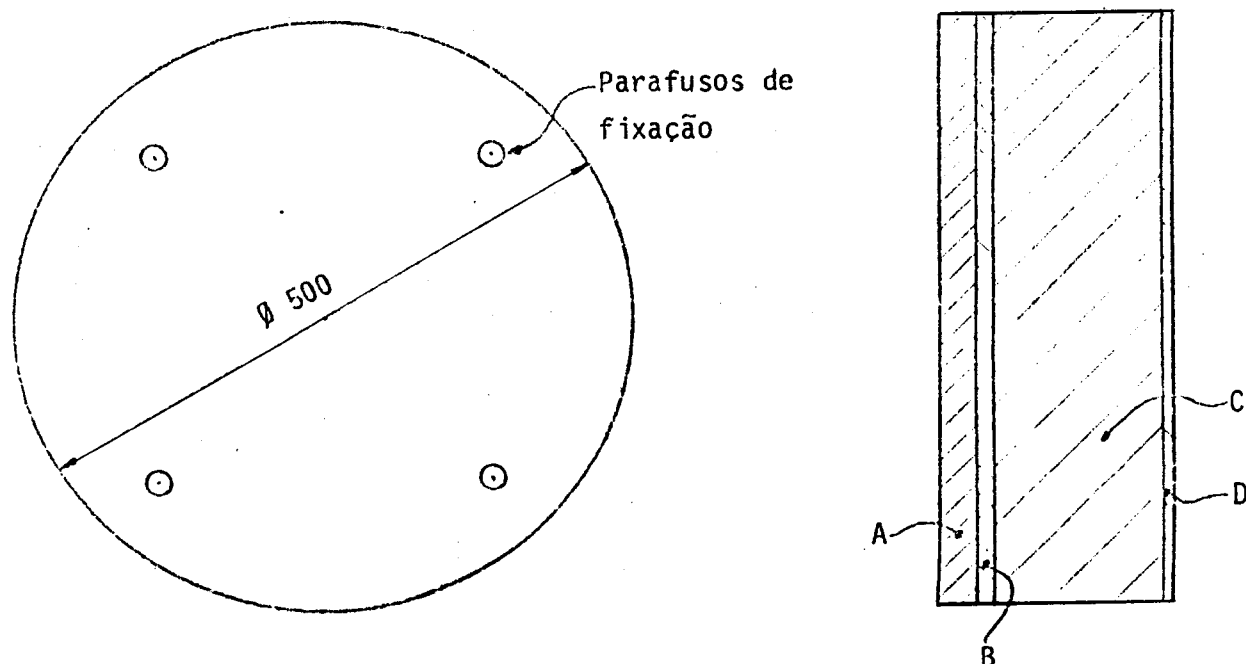


Fig. 1 - Esquema do simulador terrestre.

A camada A é de alumínio e tem uma espessura de 9mm. A camada B também é de alumínio e não tem diferença física, nem fronteira em relação à A, mas nesta camada é colocada a resistência que gera o calor, conforme esquematizado na Figura 2. A espessura desta faixa é de 2mm. A camada C é composta de lã de vidro e tem espessura de 28mm. A camada D é uma chapa de alumínio de 1mm de espessura.

Unindo todas as camadas há quatro parafusos de aço que também fixam o simulador em um suporte.

A superfície dianteira é pintada com tinta preta fosca para aumentar sua emissividade.

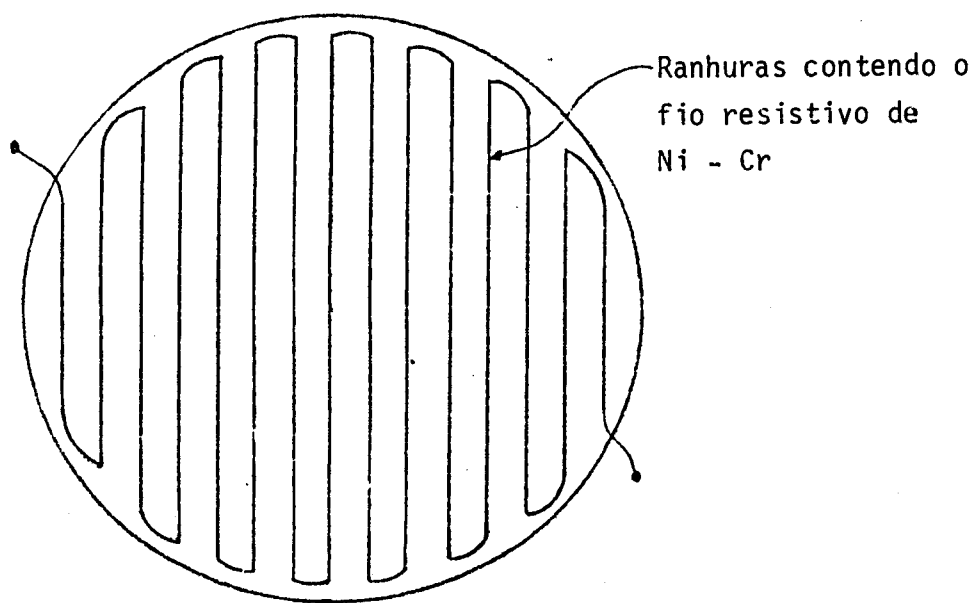
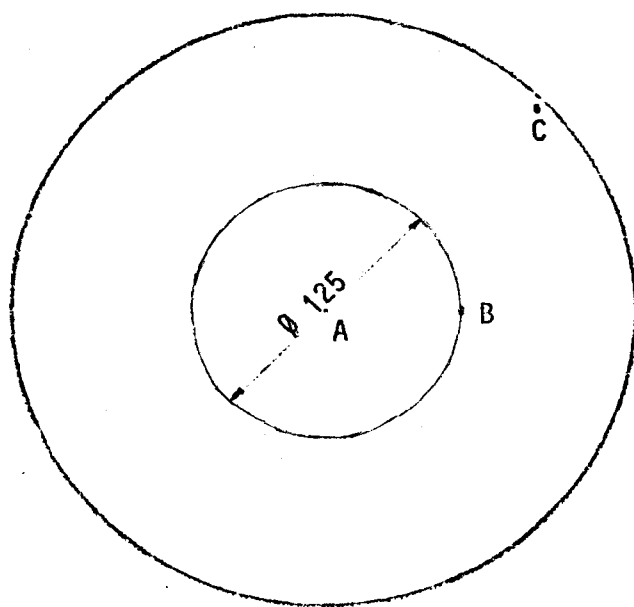


Fig. 2 - Vista esquemática da camada B.

## 2 - ENSAIOS REALIZADOS

Para avaliar o funcionamento do simulador, foram efetuados ensa<sup>u</sup>ios nos quais se fez passar uma corrente pela resistência da placa e mediu-se a temperatura da superfície em 4 pontos. Estes pontos são mostrados na Figura 3.



Obs.: o ponto D fica na mesma posição do ponto A, mas na face oposta (traseira)

Fig. 3 - Localização dos pontos para medição de temperatura.

Os pontos A e D são centrais à placa. O ponto B fica a distância de 125mm do centro, e o ponto C localiza-se na periferia da placa a aproximadamente 250mm do centro. Supondo que não haja variação de temperatura circunferencialmente, as posições dos pontos B e C foram tomadas aleatoriamente na direção circunferencial.

O equipamento utilizado no teste foi:

- um multímetro digital HP, modelo 34658, de 4,5 dígitos;
- um multímetro digital Triel, modelo TTR-310-8;
- duas fontes de corrente/tensão Tectrol, modelo TCA 40-10 com capacidade máxima de 10 A/40 V CC;
- quatro termopares do tipo T (cobre-constantã), de bitola 32;
- uma chave seletora de canais Robertshaw, modelo CHS-10P;
- uma caixa isotérmica para junção de termopares.

Ao todo foram realizados 6 testes. A Tabela 1 mostra a corrente, a tensão, a potência e a leitura obtida com os termopares em cada ponto, para cada teste.

Para a conversão dos dados de leitura em valores de temperatura foi empregada uma tabela fornecida pela Omega Engineering Inc. A comparação entre os valores medidos e os calculados é feita na Seção 4 deste trabalho.

TABELA 1

DADOS DOS ENSAIOS

ENSAIO	I (A)	V (V)	POT (W)	LEITURA EM A (V)	LEITURA EM B (V)	LEITURA EM C (V)	LEITURA EM D (V)
1	1,0	24,0	24,0	1,266	1,272	1,258	0,993
2	1,5	35,9	53,9	1,741	1,745	1,714	1,168
3	2,0	48,0	96,0	2,414	2,413	2,368	1,373
4	2,5	60,0	150,0	3,012	3,009	2,957	1,551
5	3,0	72,2	216,6	3,774	3,761	3,714	1,780
6	3,2	77,0	246,4	4,074	4,057	3,970	1,804

Obs.: em nenhum dos ensaios foi observado qualquer tipo de dano ou alteração no simulador terrestre.

Para proceder às leituras dos termopares, esperou-se um tempo suficiente para que fosse atingido o regime permanente.

Durante os testes a temperatura ambiente permaneceu ao redor dos 21°C.

### 3 - MODELO TEÓRICO

Para o modelo teórico, considerou-se o simulador como uma placa vertical em ar parado.

Os processos de transmissão de calor envolvidos foram os seguintes: condução de calor entre as camadas e através delas; radiação e convecção natural nas superfícies frontal, traseira e lateral.

A seguir são mostradas as equações básicas para estes mecanismos de troca de calor.

A condução que se verifica entre as camadas e através delas é descrita pela equação (Kreith,1977):

$$Q_{cd} = - k \cdot A_t \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

onde:

- $Q_{cd}$  : calor trocado por condução, W;
- $k$  : condutibilidade térmica do material, W/m.°C;
- $A_t$  : área transversal ao fluxo de calor, m²;
- $T$  : temperatura, K;
- $x$  : distância ao longo da qual se verifica o fluxo, m.



A radiação que ocorre entre as superfícies externas da placa e o meio ambiente é regida pela expressão (Kreith,1977):

$$Q_r = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) , \quad (2)$$

onde:

- $Q_r$  : calor trocado por radiação, W;
- $\epsilon$  : emissividade da superfície;
- $\sigma$  : constante de Stephan-Soltzmann,  $\sigma = 5,667 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  ;
- $A$  : área de troca de calor,  $\text{m}^2$ ;
- $T_s$  : temperatura da superfície, K;
- $T_\infty$  : temperatura do meio ambiente, K.

Para a superfície dianteira, pintada de preto, foi admitida uma emissividade de 0,9. Para a superfície traseira, de alumínio, admitiu-se uma emissividade de 0,5. Para as superfícies laterais, as camadas foram consideradas separadamente. Considerando que a camada A tem uma parte pintada de preto e outra coberta com fita teflon, admitiram-se emissividade de 0,9 e 0,7 para cada parte, respectivamente. Como a lateral de camada B é recoberta de teflon, sua emissividade também foi considerada 0,7. A lateral da camada C é coberta por uma chapa de alumínio e a camada D é de alumínio, tendo ambas emissividade de 0,5.

O mecanismo de troca de calor por convecção é regido pela expressão (Kreith,1977):

$$Q_{cv} = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) , \quad (3)$$

onde:

- $Q_{cv}$  : calor trocado por convecção, W;
- $h_c$  : coeficiente de película,  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

A avaliação do coeficiente de película para as superfícies frontal e traseira, ambas verticais, é obtida da relação:

$$h_c = 0,555 \frac{k_{ar}}{L} (P_r \cdot G_{rL})^{1/4}, \quad (4)$$

sendo  $k_{ar}$  a condutibilidade térmica do ar,  $P_r$  o número adimensional de Prandtl e  $G_{rL}$  o número adimensional de Grashof avaliado no comprimento  $L$ . Este comprimento é calculado como o lado de um quadrado que tenha a mesma área da placa circular considerada. Para este caso,  $L = 0,443$  m.

Os números adimensionais acima são dados por:

$$P_r = \frac{cp \cdot \mu}{k_{ar}} \quad e \quad (5)$$

$$G_{rL} = \frac{\rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\mu^2}, \quad (6)$$

sendo:

- $cp$  : calor específico a pressão constante do ar, J/kg.k ;
- $\mu$  : viscosidade do ar, N.s/m<sup>2</sup> ;
- $\rho$  : massa específica do ar, kg/m<sup>3</sup> ;
- $g$  : aceleração da gravidade,  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> ;
- $\beta$  : coeficiente de expansão térmica, K<sup>-1</sup>.

Para as bordas laterais, considerou-se o modelo de um cilindro horizontal. Neste caso, o coeficiente de película é dado por (Kreith , 1977):

$$h_c = 0,708 \left( \frac{T_s - T_\infty}{L} \right)^{1/4}, \quad (7)$$

com  $h_c$  em  $W/m^2.K$ . para  $Gr < 10^9$ .

Como a temperatura ambiente durante os testes foi de  $21^{\circ}C$ , todas as propriedades referentes ao ar foram avaliadas em uma temperatura média entre a ambiente e a da superfície.

O modelo matemático adotado para a avaliação das temperaturas está contido em um programa disponível na área da Térmica, de nome TEMPERA. Este programa utiliza o método das diferentes finitas, o que torna necessária a divisão da placa em nós.

Para isto foi adotada uma simplificação do modelo: admitindo que a geração de calor na placa seja uniforme, pode-se supor que o fluxo de calor seja apenas radial e axial, não havendo fluxo circunferencial. Isto equivale a supor que, passando um plano pelo centro do círculo, perpendicular à sua superfície, nenhum calor atravessa este plano.

Com base nesta hipótese, ao invés de modelar toda a circunferência, apenas um setor dela será considerado. Este setor é dividido em 10 partes na direção radial e em 5 camadas na direção axial. Estas camadas são aquelas mostradas na Figura 1, sendo a camada A dividida em duas outras: uma com 2 mm de espessura a partir da superfície e outra de 7 mm entre esta e a B. Com isto, o setor inicial fica dividido em 50 pedaços, denominados, para efeito de modelagem, "nós". Esta divisão foi feita porque o programa fornece como saída a temperatura do centro do nó. Assim, para ter aproximadamente a temperatura da superfície, fez-se esta divisão que permite obter a temperatura de um plano a 1 mm da superfície.

Os 50 nós obtidos são mostrados na Figura 4. Note-se que o segmento  $\overline{AB}$  é uma reta, quando deveria ser um arco. Isto ocorre porque o programa de análise de temperaturas sempre une dois pontos por uma reta. O ângulo de 10 graus foi escolhido justamente para minimizar a diferença entre o modelo e a placa real.

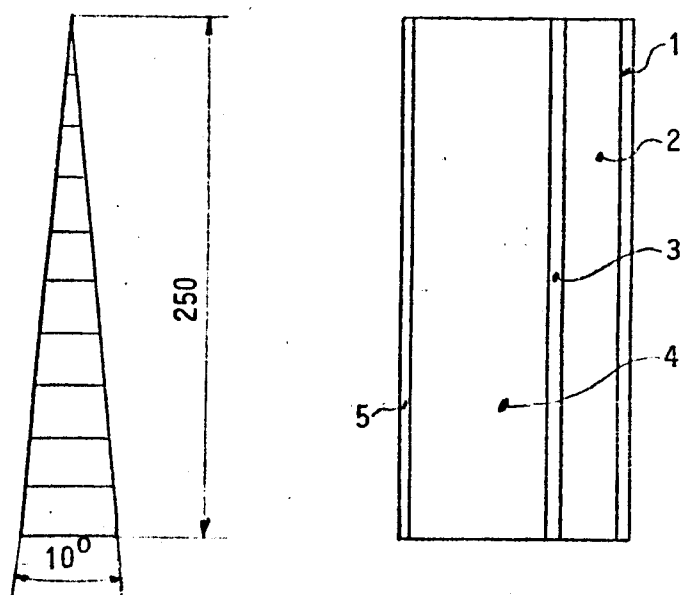


Fig. 4 - Setor de placa utilizada na modelagem e suas camadas.

Uma breve descrição das camadas é dada a seguir:

- camada 1: alumínio com 2 mm de espessura;
- camada 2: alumínio com 7 mm de espessura;
- camada 3: alumínio com 2 mm de espessura; esta camada possui o fio resistivo de Ni-Cr, responsável pelo aquecimento da placa, revestido de lã de vidro para isolá-lo eletricamente desta;
- camada 4: material isolante com 28 mm de espessura;
- camada 5: alumínio com 1 mm de espessura.

### 3.1 - CÁLCULO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE DA CAMADA DE ISOLANTE

Conforme mencionado na Seção 1, a camada 4 de lã de vidro tem seu efeito isolante sensivelmente reduzido pela presença de 4 parafusos de aço. Para levar em conta este efeito, calcula-se uma condutibilidade térmica equivalente, da maneira explicada a seguir.

A lã de vidro e os parafusos são considerados como resistências condutivas em paralelo, sendo a resistência equivalente calculada

por:

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_p}{R_1 + R_p}, \quad (8)$$

onde  $R_1$  é a resistência de lâ de vidro, dada por:

$$R_1 = \frac{L_1}{k_1 \cdot A_1} \quad (9)$$

e  $R_p$  a resistência total dos parafusos, dada por:

$$R_p = \frac{L_1}{k_p \cdot A_p}. \quad (10)$$

Os símbolos que aparecem nestas equações significam:

- $k_1$  e  $k_p$  : condutibilidades, respectivamente, da lâ de vidro e do material do parafuso;
- $L_1$  : comprimento da camada de lâ de vidro;
- $A_1$  : área ocupada pela lâ perpendicular ao fluxo de calor;
- $A_p$  : área total das seções dos parafusos.

Assim, a condutibilidade térmica equivalente desta camada é dada por:

$$k_{eq} = \frac{L_1}{R_{eq} \cdot A_t},$$

sendo  $A_t$  a área total da superfície da placa.

Os dados adotados para os cálculos acima foram:

$$L = 28 \text{ mm};$$

$$A_p = 3,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2;$$

$$k_p = 54 \text{ W/m.k (Eckert and Drake Jr., 1972)}$$

$$A_1 = 0,1962 \text{ m}^2;$$

$$A_t = 0,1964 \text{ m}^2;$$

$$k_1 = 0,04303 \text{ W/m.k (Torreira, 1980).}$$

Com os valores acima, obtêm-se:

$$k_{eq} = 0,0784 \text{ W/m.k.}$$

### 3.2 - CÁLCULO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA ENTRE CAMADAS

Entre duas camadas adjacentes do simulador, a troca de calor se dá por condução. A Figura 5 esquematiza as resistências térmicas presentes.

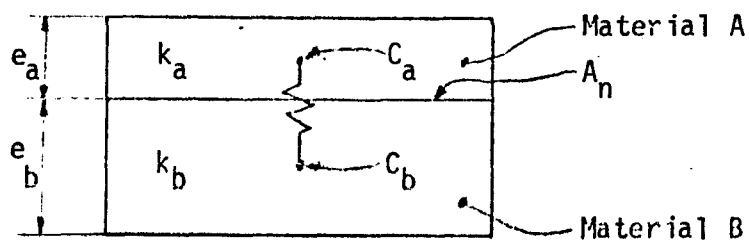


Fig. 5 - Resistências térmicas entre camadas.

Na figura 5,  $C_a$  e  $C_b$  são os centros geométricos dos respectivos nós,

A resistência entre estes dois nós é a resistência entre os pontos  $C_a$  e  $C_b$ . Assim, tem-se:

$$R_{ab} = \frac{e_a/2}{k_a \cdot A_n} + \frac{e_b/2}{k_b \cdot A_n} = \frac{1}{2A_n} \left( \frac{e_a}{k_a} + \frac{e_b}{k_b} \right), \quad (12)$$

Nesta equação,  $A_n$  representa a área da fronteira entre os dois nós.

Com base nesta última expressão, é possível obter as resistências entre as 5 camadas.

Para as camadas 1 e 2, ambas de alumínio, a Relação 12 torna-se:

$$R_{12} = \frac{1}{2 A_n \cdot k_{a1}} \cdot (e_1 + e_2),$$

sendo  $e_1 = 2 \text{ mm}$  e  $e_2 = 7 \text{ mm}$ .

A condutibilidade térmica do alumínio é  $154,9 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  (Alcan Alumínio do Brasil, s.d), e a área  $A$  é diferente para cada par de nós. Então:

$$R_{12} = \frac{0,009}{2 \cdot 154,9 \cdot A_n} = \frac{2,905 \times 10^{-5}}{A_n}. \quad (13)$$

Entre as camadas 2 e 3 o mesmo cálculo acima é válido, por

ter a camada 3 a mesma espessura da camada 1 e ser de alumínio.

Para as camadas 3 e 4 a Equação 12 torna-se:

$$R_{34} = \frac{1}{2 A_n} \left( \frac{0,002}{154,9} + \frac{0,028}{0,04303} \right) = \frac{0,3254}{A_n} . \quad (14)$$

Observa-se que a primeira parcela, referente ao alumínio, é totalmente desprezável face à segunda.

Para as camadas 4 e 5 o mesmo resultado anterior é válido , por ser esta última de alumínio e ter apenas 1mm de espessura.

### 3.2.1 - CÁLCULO DAS ÁREAS DOS NÓS

A Figura 6 mostra a numeração dos nós da camada 1.

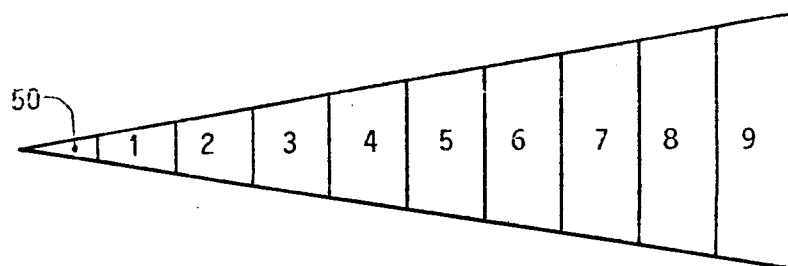


Fig. 6 - Numeração dos nós da camada 1.

O ângulo de abertura do setor é de 10 graus e o comprimento de cada nó é de 25mm. As áreas dos nós e as larguras das fronteiras entre nós



adjacentes estão na Tabela 2.

Nas demais camadas, as áreas dos nós correspondentes e a largura das fronteiras são as mesmas, variando apenas as espessuras.

Assim, conhecidas as áreas dos nós, pode-se introduzi-las nas Equações 13 e 14 para obter a resistência entre nós correspondentes de camadas adjacentes.

TABELA 2

ÁREAS DOS NÓS E LARGURA DAS FRONTEIRAS DA CAMADA 1

NÓ	ÁREA ( $10^{-4} \text{m}^2$ )	LARGURA DA FRONTEIRA' ( $10^{-3} \text{m}$ )
50	0,468	4,374
1	1,640	8,749
2	2,734	13,12
3	3,828	17,50
4	4,921	21,87
5	6,015	26,25
6	7,108	30,62
7	8,202	35,00
8	9,296	39,37
9	10,39	43,74

3.3 - CÁLCULO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA ENTRE NÓS DA MESMA CAMADA

Dentro de uma camada (ver Figura 6), a resistência entre dois

nós adjacentes, que é devida à condução, é dada por:

$$R_{ij} = \frac{L}{k \cdot A_{ij}}, \quad (15)$$

sendo  $A_{ij}$  a área da fronteira entre os nós.

Para todos os cálculos,  $L = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$ . A condutibilidade considerada é a da camada em questão. A área da fronteira é dada pelo produto entre a espessura da camada e a largura da fronteira. Com isto, a Expressão 15 torna-se:

$$R_{ij} = \frac{0,025}{k \cdot e \cdot l_{ij}}, \quad (16)$$

sendo  $e$  a espessura da camada e  $l_{ij}$  a largura da fronteira entre os nós  $i$  e  $j$ , fornecida na Tabela 2.

#### 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Para poder avaliar o modelo empregado, mostra-se na Tabela 3 a comparação entre os valores de temperatura medidos e os calculados.

Definindo um erro  $\epsilon_t$  como:

$$\epsilon_t = \frac{T_c - T_m}{T_m - T_\infty} \times 100\%, \quad (17)$$

sendo  $T_c$  a temperatura calculada,  $T_m$  a medida e  $T_\infty$  a ambiente, pode-se ver a eficiência do modelo na Tabela 4.

TABELA 3

COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE TEMPERATURA MEDIDOS E ENSAIADOS

POTÊNCIA (W)	T <sub>A</sub> (°C)		T <sub>B</sub> (°C)		T <sub>C</sub> (°C)		T <sub>D</sub> (°C)	
	MEDIDA	CALCULADA	MEDIDA	CALCULADA	MEDIDA	CALCULADA	MEDIDA	CALCULADA
24,0	31,7	31,8	31,8	31,8	31,5	31,7	25,0	24,2
53,9	43,1	43,4	43,2	43,4	42,4	43,3	29,3	27,4
96,0	58,8	57,9	58,8	57,8	57,7	57,7	34,3	31,1
150,0	72,3	74,5	72,3	74,5	71,1	74,2	38,6	34,9
216,6	90,3	92,5	88,9	92,5	87,8	92,1	44,0	39,1
246,4	95,6	100,8	95,3	100,8	93,4	100,4	44,6	41,1

TABELA 4

FATOR DE ERRO  $\epsilon_t$  NOS PONTOS (%)

POTÊNCIA (W)	PONTO A	PONTO B	PONTO C	PONTO D
24,0	0,93	0	1,90	-20,0
53,9	1,36	0,90	4,21	-22,9
96,0	-2,38	-2,65	0	-24,1
150,0	4,29	4,29	6,19	-21,0
216,6	3,17	5,30	6,44	-21,3
246,4	6,97	7,40	9,67	-14,8

Pela Tabela 4 constata-se que o maior erro encontra-se no ponto D, que é o único ponto de medição na superfície traseira da placa. O erro médio neste ponto é da ordem de 20%.

Na superfície frontal, todos os erros estiveram abaixo de 10%, com valor médio da ordem de 3,2%.

Os erros na superfície traseira podem ser explicados por duas causas principais.

Inicialmente, como a modelagem foi efetuada após os ensaios, o cálculo dos coeficientes de película foi feito com base nas temperaturas obtidas nos ensaios. Se fosse feita nova iteração, recalculando estes coeficientes com as temperaturas fornecidas pelo modelo, os resultados finais seriam muito mais próximo dos reais. Isto, entretanto, não foi feito porque a superfície de interesse é a frontal, onde o erro médio é cerca de 3%.

Em segundo lugar, pode-se supor que a condutibilidade térmica equivalente da camada de isolante empregada no modelo é inferior à real,

pois em quase todos os casos, as temperaturas da face frontal medidas são inferiores às calculadas, e na face posterior ocorre o contrário em todos os casos.

Como os erros obtidos na face de interesse (frontal) estão dentro da faixa de erro de medidas experimentais, tais como leituras de termopares, medições de potência etc., pode-se afirmar que o modelo adotado é altamente satisfatório, sendo considerado adequado para a previsão do funcionamento de outros simuladores terrestres.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KREITH, F. *Princípios da Transmissão de Calor*, Tradução da 3ª edição americana, São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1977.
- ECKERT, E. R. G.; DRAKE JR, R. M. *Analysis of Heat and Mass Transfer*. Tokyo, McGraw-Hill, Inc., 1972.
- TORREIRA, R. *Isolamento Térmico*. São Paulo, Fulton Editora Técnica Ltda, 1980.
- Alcan Alumínio do Brasil S.A. Perfis Tabelados. São Paulo.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

PROPOSTA PARA  
PUBLICAÇÃO

- ☐ DISSERTAÇÃO  
☐ TESE  
☒ RELATÓRIO  
☐ OUTROS

TÍTULO

Simulados Terrestre - Comparação entre Resultados Teóricos e Ensaios

IDENTIFICAÇÃO

AUTOR(ES)

Ismael Emílio de Oliveira Júnior  
Márcia Barbosa Henriques Mantelli

478

ORIENTADOR

CO-ORIENTADOR

DISS. OU TESE

LIMITE

DEFESA

CURSO

ORGAO

DMC

DIVULGAÇÃO

- ☐ EXTERNA ☒ INTERNA ☐ RESTRITA  
☐ CONGRESSO ☐ REVISÃO ☐ OUTROS

EVENTO/MEIO

NOME DO REVISOR

REV. TÉCNICA

RECEBIDO

DEVOLVIDO

ASSINATURA

Nº

PRIOR.

RECEBIDO

NOME DO REVISOR

PÁG.

DEVOLVIDO

ASSINATURA

APROVADO

DATA

ASSINATURA

- ☐ SIM  
☐ NÃO

06/08/87

W. C. Silva

APROVAÇÃO

REV. LINGUAGEM

Nº

PRIOR.

RECEBIDO

NOME DO REVISOR

PÁG.

DEVOLVIDO

ASSINATURA

OS AUTORES DEVEM MENCIONAR NO VERSO INSTRUÇÕES ESPECÍFICAS, ANEXANDO NORMAS, SE HOUVER

RECEBIDO

DEVOLVIDO

NOME DA DATILÓGRAFA

DATILOGRAFIA

Nº DA PUBLICAÇÃO:

PÁG.:

CÓPIAS:

Nº DISCO:

LOCAL:

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO

☐ SIM

☐ NÃO

\_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

DIRETOR

OBSERVAÇÕES E NOTAS