



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.25.19.19-TDI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA  
TÉRMICA DE CONTATO NA INTERFACE ENTRE  
EQUIPAMENTOS E PAINÉIS ESTRUTURAIS DE  
SATÉLITES**

Rafael Lopes Costa

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle, orientada pelos Drs. Valeri Vlassov Vladimirovich, e Issamu Muraoka, aprovada em 08 de agosto de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RGPJQH>>

INPE  
São José dos Campos  
2018

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

## **COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

### **Presidente:**

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

### **Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.25.19.19-TDI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA  
TÉRMICA DE CONTATO NA INTERFACE ENTRE  
EQUIPAMENTOS E PAINÉIS ESTRUTURAIS DE  
SATÉLITES**

Rafael Lopes Costa

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle, orientada pelos Drs. Valeri Vlassov Vladimirovich, e Issamu Muraoka, aprovada em 08 de agosto de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RGPJQH>>

INPE  
São José dos Campos  
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Costa, Rafael Lopes.

C823e      Estudo experimental da resistência térmica de contato na interface entre equipamentos e painéis estruturais de satélites / Rafael Lopes Costa. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xxvi + 219 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.25.19.19-TDI)

Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Valeri Vlassov Vladimirovich, e Issamu Muraoka.

1. Controle térmico de satélites. 2. Materiais de interface térmica. 3. Resistência térmica de contato. I.Título.

CDU 629.7.048.8:629.78

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

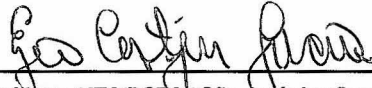
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Rafael Lopes Costa**

Título: "ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO NA INTERFACE ENTRE EQUIPAMENTOS E PAINÉIS ESTRUTURAIS DE SATÉLITES"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Doutor(a)** em **Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle**

Dr. Ezio Castejon Garcia

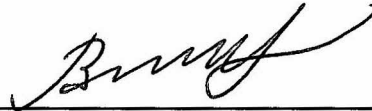


Presidente / ITA/DCTA / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Valeri Vlassov Vladimirovich



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Issamu Muraoka



Orientador(a) / . / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Denio Lemos Panissi



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado  Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

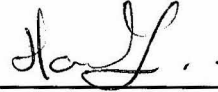
maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 08 de agosto de 2018

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Doutor(a)** em  
**Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica  
Espacial e Controle**

Dr. Humberto Pontes Cardoso



---

Convidado(a) / Equatorial Sistemas / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado      ( ) Reprovado

**Este trabalho foi aprovado por:**

( ) maioria simples

unanimidade

**São José dos Campos, 08 de agosto de 2018**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente eu gostaria de agradecer imensamente por todo o apoio técnico, dedicação e motivação do meu orientador Valeri Vlassov, o qual tornou possível este trabalho ser realizado. Agradecimentos ao meu orientador Issamu Muraoka pelo apoio técnico altamente importante para a realização do trabalho. Agradecimentos especial à minha família, meus pais Osmar e Sandra, meus irmãos Lucas e Mateus e à minha amiga e esposa Fernanda pela motivação e compreensão em todas as horas. Agradeço ao SEMA pela disponibilidade e competência para manufaturar as partes mecânicas do aparato experimental. Agradeço também ao pessoal da térmica do LIT pelo apoio na realização dos testes experimentais. Ainda, meu grande agradecimento ao laboratório de metrologia física do LIT, ao professor Nelson Veissid e ao colega e amigo Rafael Roque pelo auxílio na calibração dos sensores usados no experimento. Meus agradecimentos ao pessoal da integração mecânica do LIT, em especial ao meu grande amigo Gitsuzo Tagawa pelo auxílio no mapeamento das propriedades mecânicas do espécime. Agradeço também ao amigo e colega Douglas pelo auxílio no ajuste do TMM. Por fim, agradeço aos meus colegas de grupo Godói, Marcelo, Pedrinho e Pivato pelo auxílio técnico.





## RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo experimental com objetivo de testar comparativamente a interface térmica entre equipamentos eletrônicos com estrutura de alumínio e painéis sanduíche com chapas de face e estrutura de honeycomb de alumínio na configuração tipicamente encontrada em satélites. Um dispositivo único foi desenvolvido para permitir que cinco diferentes interfaces fossem testadas simultaneamente em condições térmicas equivalentes em vácuo. Os materiais testados foram eGraf, folha de índio, graxa térmica e RTV566, além de interface sem material. Foram realizados dois testes com diferença de estocagem de seis meses entre eles, ambos com caracterização de desempenho térmico dos conjuntos com aplicação homogênea e não homogênea de potência, incluindo ciclagem térmica. Dados comparativos inéditos foram gerados revelando a importância do uso de material de interface na região dos pés, onde o equipamento é parafusado, além da avaliação quantitativa do aumento na concentração nas diferenças de temperatura quando a potência é aplicada concentrada. Foi levantada a diferença de desempenho térmico entre ambiente de vácuo e pressão atmosférica, revelando grandes diferenças que devem ser levadas em conta pelo projetista. Um TMM detalhado foi criado e permitiu o ajuste e mapeamento da resistência térmica de contato ao longo da interface permitindo a comparação quantitativa entre as interfaces, revelando a graxa térmica como a de melhor desempenho, seguida do RTV566. Ainda, foi identificado que não houve mudança de desempenho térmico após os ciclos térmicos. Por fim, foi observada uma degradação expressiva da graxa térmica após estocagem de seis meses. Um estudo da área de contato foi conduzido com o uso de uma interface transparente e revelou aumento da área de contato da graxa térmica quando submetida a vácuo, enquanto a do RTV566 permaneceu inalterada. Ainda, é proposta uma metodologia para o cálculo de espessura mínima de aplicação de materiais fluidos.

Palavras-chave: Controle Térmico de Satélites. Materiais de Interface Térmica. Resistência Térmica de Contato.



# **EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL CONTACT RESISTANCE IN THE INTERFACE BETWEEN SATELLITE EQUIPMENT AND STRUCTURAL PANELS**

## **ABSTRACT**

This work presents an experimental study aiming to compare the thermal interface between aluminum structure electronic equipment and honeycomb sandwich panels in satellites typical configuration. An unique device has been developed to allow five different interfaces to be simultaneously tested under equivalent thermal vacuum conditions. The materials eGraf, indium foil, thermal grease and RTV566 were tested, as well as a bare interface. Two tests have been performed with six months of storage between them, both presenting the thermal performance characterization of the samples with homogeneous and non-homogeneous power dissipation, including thermal cycling. New comparative data was generated revealing the importance of interface material use on the screw regions, besides the evaluation of the hot spots when concentrated power is applied. The thermal performance difference between vacuum and atmospheric pressure was compared, revealing great thermal differences that must be taken into account by the equipment designer. A detailed TMM was developed and adjusted to map the thermal contact resistance along the interface allowing the quantitative comparison between the samples, thermal grease presented the best performance followed by the RTV566. Also, it was identified that there was no change in thermal performance after the thermal cycles. Finally, it was observed a significant degradation of the thermal grease after six months storage. A contact area study was conducted using a transparent interface and revealed an increase in contact area of the thermal grease when subjected to vacuum, while the RTV566 remained unchanged. Also, it was presented a methodology for the minimum thickness calculation to be used for fluid materials.

Keywords: Satellite Thermal Control. Thermal Interface Materials. Thermal Contact Resistance.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - Representação esquemática de dois sólidos em contato e o fluxo de calor na interface, mostrando a constrição das linhas.....	1
Figura 1.2 – Distribuição de temperatura ao longo de 2 sólidos do mesmo material em contato.....	2
Figura 1.3 – Base do equipamento <i>MWT SDC</i> utilizado nos satélites <i>CBERS 3&amp;4</i> .....	3
Figura 1.4 – Esquema do caminho térmico do calor gerado pelo equipamento.	4
Figura 1.5 – Interfaces sem material (a), com material sem pressão (b) e com material sob pressão (c).....	4
Figura 1.6 – Representação esquemática da deformação na interface parafusada (exagerada).....	5
Figura 1.7 – Configuração de teste – acoplamento com placa refrigerada. ....	6
Figura 1.8 – Instrumentação do simulador de equipamento e painel. ....	7
Figura 1.9 – Configuração com 8 parafusos, filmes sensíveis a pressão.....	8
Figura 1.10 – Configuração do setup de teste para determinação da resistência térmica de contato.....	9
Figura 1.11 – Configuração de teste, sem a manta de MLI.....	10
Figura 1.12 – Ilustração de interface sem material (em pressão atmosférica), com material ideal e material real.....	11
Figura 1.13 – Configurações utilizadas no teste. (a) dimensões 5x5” e dois aquecedores; (b) dimensões 8,5x10” com 3 aquecedores – simulação do módulo de potência de um veículo espacial.....	13
Figura 1.14 – Esquema com as redes de resistências na junta parafusada. ...	14
Figura 1.15 – Configuração do teste, condutímetro dentro da câmara de vácuo. ....	15
Figura 1.16 – Conceito de regiões típicas na interface. ....	16
Figura 3.1 – Ilustração do eGraf® Hitherm™ 1200 .....	23
Figura 3.2 - Instalação do eGraf® Hitherm™ 1200 .....	23
Figura 3.3 – Folha de índio com largura de 1”.....	24
Figura 3.4 – Aplicação de folha de índio na base do <i>dummy</i> .....	25
Figura 3.5 – Graxa térmica <i>340 HS compound</i> .....	26
Figura 3.6 – Aplicação da graxa térmica .....	26
Figura 3.7 – RTV 566 Momentive.....	27
Figura 3.8 – Mistura de resina com catalisador é realizada com o uso de uma balança.....	28
Figura 3.9 – Aplicação de RTV566 – corte do excesso nas bordas .....	29

Figura 4.1 – Equipamento e painel do satélite CBERS 3, após desmontagem em 2012 .....	31
Figura 4.2 - Mantas de RTV566 mostrando falta de contato em alguns regiões .....	32
Figura 4.3 – Aparato utilizado para avaliar a aplicação de graxa térmica e RTV566 .....	33
Figura 4.4 – Graxa térmica aplicada com vidro posicionado sem torque e com torque em 4 e 6 pontos de fixação .....	34
Figura 4.5 – Evolução das bolhas de ar na interface com graxa térmica sob baixa pressão ( $\sim 10^{-3}$ mbar) .....	34
Figura 4.6 – Graxa térmica em pressão ambiente: antes e depois do vácuo... 35	
Figura 4.7 – Bolhas de ar sendo expelidas nas bordas do vidro .....	35
Figura 4.8 – RTV566 aplicado com vidro sem torque e com torque em 4 e 6 pontos de fixação .....	36
Figura 4.9 – RTV566 em pressão ambiente: antes e depois do vácuo .....	37
Figura 4.10 – manta pré-curada de RTV566 com bolhas de ar, antes e quando submetida a vácuo ( $\sim 10^{-3}$ mbar).....	37
Figura 5.1 – Esquema da estrutura painel sanduíche de <i>honeycomb</i> .....	39
Figura 5.2 – Detalhes construtivos do painel utilizado. ....	40
Figura 5.3 - Desenho do <i>dummy</i> de equipamento eletrônico .....	41
Figura 5.4. Simulação de duas configurações de posicionamento das amostras.....	42
Figura 5.5 – Conjunto <i>dummy</i> -painel .....	43
Figura 5.6 – Esquema de montagem do conjunto <i>dummy</i> -painel .....	44
Figura 5.7 – Fotografia de um dos conjuntos já montado com MLI .....	45
Figura 5.8 – Esquema da localização dos sensores de temperatura – termistores.....	46
Figura 5.9 – Detalhe de acoplamento do fio do sensor no painel.....	46
Figura 5.10 – Painel sendo retrabalhado para receber insertos e sensores de temperatura (acima); painéis prontos para usar no experimento (abaixo). ....	47
Figura 5.11 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D1/P1 ...	48
Figura 5.12 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D2/P2 ...	48
Figura 5.13 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D3/P5 ...	49
Figura 5.14 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D4/P3 ...	49
Figura 5.15 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D5/P4 ...	49
Figura 5.16 – Distribuição dos aquecedores na base do <i>dummy</i> .....	50
Figura 5.17 – Circuitos elétricos dos heaters .....	51
Figura 5.18 – Montagem do experimento (somente um conjunto montado) ....	52
Figura 5.19 – Fotografia de um conjunto montado na estrutura, vista externa (radiador) e interna (MLI) .....	52

Figura 5.20 – Montagem final do experimento .....	53
Figura 5.21 – Dimensões internas da Câmara Vácuo-Térmica de 1x1 m .....	54
Figura 5.22 – Esquema da configuração de teste .....	55
Figura 5.23 – Aparato pendurado dentro da CVT 1x1 m do LIT.....	56
Figura 6.1 – TMM do aparato dentro do <i>shroud</i> da CVT.....	58
Figura 6.2 – TMM simplificado do experimento – mapa de temperaturas.....	59
Figura 6.3 – Modos de operação dos <i>dummies</i> .....	60
Figura 6.4 – Fases do Teste 1.....	62
Figura 6.5 – Fases do Teste 2.....	66
Figura 7.1 – CVT 1x1 do LIT .....	70
Figura 7.2 – Sistema de aquisição de dados e <i>software</i> .....	71
Figura 7.3 – Rack com as fontes de alimentação.....	71
Figura 7.4 – Temperatura dos termopares de referência Teste 1 (TRP do <i>dummy</i> ) .....	72
Figura 7.5 – Distribuição de temperaturas ao longo da camisa da CVT durante o Teste 1 .....	73
Figura 7.6 – Pressão da CVT durante o Teste 1, sensor Penning .....	74
Figura 7.7 - Temperatura dos termopares de referência Teste 2 (TRP do <i>dummy</i> ) .....	75
Figura 7.8 - Distribuição de temperaturas ao longo da camisa da CVT durante o Teste 2 .....	76
Figura 7.9 - Pressão da CVT durante o Teste 2.....	77
Figura 8.1 – Desenho esquemático da posição das temperaturas.....	80
Figura 8.2 – Gráfico com transiente de temperaturas dos dados experimentais .....	81
Figura 8.3 – Gráfico com transiente de $\ln(\Delta T)$ , dos dados experimentais, mostrando regimes desordenado ( $\sim 0-800$ s) e ordenado ( $> \sim 800$ s) .....	82
Figura 8.4 – Gráfico com as curvas de temperatura do TMM para validação da metodologia.....	88
Figura 8.5 – Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – sem material .....	92
Figura 8.6 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – eGraf .....	93
Figura 8.7 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – folha de índio .....	94
Figura 8.8 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – graxa térmica .....	95
Figura 8.9 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – RTV566 .....	97

Figura 8.10 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – sem material .....	99
Figura 8.11 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – eGraf .....	100
Figura 8.12 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – folha de índio .....	101
Figura 8.13 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – graxa térmica .....	102
Figura 8.14 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – RTV566 .....	103
Figura 8.15 – Diferentes zonas na interface baseadas nos sensores de temperatura .....	105
Figura 8.16 – dTs, Teste 1, graxa térmica, Fases 13, 14, 15 (33,3 W), respectivamente .....	116
Figura 8.17 - Temperaturas nos TRPs das cinco interfaces em vácuo, $T_{sh}=25$ °C, $Q=9.4$ W .....	119
Figura 8.18 – Temperaturas nos TRPs das cinco interfaces em pressão atmosférica, $T_{sh}=25$ °C, $Q=9.4$ W .....	120
Figura 9.1 - Ilustração geral do TMM detalhado .....	123
Figura 9.2 – Conjunto <i>dummy</i> -painel dentro da CVT 1x1 m .....	124
Figura 9.3 - Partes do <i>dummy</i> com bom contato térmico .....	125
Figura 9.4 - Representação dos aquecedores através de superfícies .....	126
Figura 9.5 - Sensores de temperatura no TMM .....	127
Figura 9.6 - Termistores instalados no <i>facesheet</i> do painel com fiação .....	128
Figura 9.7 - Detalhe dos termistores instalados no <i>facesheet</i> do painel, com fiação .....	129
Figura 9.8 – Grupo de radiação ativo no TMM, dentro da CVT 1x1 m .....	130
Figura 9.9 - Modelo simplificado de acoplamento térmico em uma interface parafusada .....	131
Figura 9.10 - Modelo para cálculo de $h$ por condução do disco .....	131
Figura 9.11 – Método de subdivisão para correlação analítica .....	133
Figura 9.12 – Condutância de contato em função pressão de contato para interface de alumínio em vácuo .....	135
Figura 9.13 – Esquema do modelo analítico de acoplamento térmico com resistências em série .....	136
Figura 9.14 – Diferentes zonas na interface baseadas nos sensores de temperatura .....	138
Figura 9.15 – Esquema de resistências na interface .....	139
Figura 9.16 – Esquema de contato na interface no TMM – região 1 .....	141
Figura 9.17 – Fluxograma de ajuste dos valores de $h$ .....	143



Figura 9.18 – Ilustração do processo de busca de solução por <i>coordinate descent</i> .....	144
Figura 9.19 – Exemplo de trajetórias da busca para interface com graxa térmica, T1F13 domínio $h_5$ e $h_7$ .....	145
Figura 9.20 - Exemplo de trajetórias da busca para interface sem material, T1F13 domínio $h_5$ e $h_7$ . ....	146
Figura 9.21 – $h$ médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – sem material .....	150
Figura 9.22 - $h$ médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – eGraf.....	151
Figura 9.23 - $h$ médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – folha de índio .....	152
Figura 9.24 - $h$ médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – graxa térmica.....	153
Figura 9.25 - $h$ médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – RTV566 .....	154
Figura A.1 - Localização dos termistores e termopares do D1 (vista superior – <i>dummy</i> ) .....	165
Figura A.2 - Localização dos termistores e termopares do D2 (vista superior – <i>dummy</i> ) .....	166
Figura A.3 - Localização dos termistores e termopares do D3 (vista superior – <i>dummy</i> ) .....	167
Figura A.4 - Localização dos termistores e termopares do D4 (vista superior – <i>dummy</i> ) .....	167
Figura A.5 - Localização dos termistores e termopares do D5 (vista superior – <i>dummy</i> ) .....	168
Figura A.6 - Localização dos termistores e termopares do P1 (vista inferior – radiador).....	169
Figura A.7 - Localização dos termistores e termopares do P2 (vista inferior – radiador).....	169
Figura A.8 - Localização dos termistores e termopares do P3 (vista inferior – radiador).....	170
Figura A.9 - Localização dos termistores e termopares do P4 (vista inferior – radiador).....	170
Figura A.10 - Localização dos termistores e termopares do P5 (vista inferior – radiador).....	171
Figura A.11 – Esquema de pinos dos conectores DD-50 (macho).....	174
Figura A.12 – Distribuição dos aquecedores na base do <i>dummy</i> .....	176
Figura A.13 – Circuitos elétricos dos heaters.....	178
Figura B.1 – Descrição geométrica do termistor utilizado .....	179

Figura B.2 – Curva típica média de variação da resistência x temperatura ...	180
Figura B.3 – Fluxograma para correção das temperaturas medidas.....	186
Figura B.4 – Incertezas de resistência e temperatura dos termistores informada pelo fabricante.....	188
Figura B.5 - Fios de um sensor de temperatura atuando como aletas radiativas .....	192
Figura B.6 – Recomendação de aterramento térmico da fiação dos sensores dos painéis .....	193
Figura B.7 - Fios saindo inclinados, com ângulo de 20° em relação ao painel .....	193
Figura C.1 – Gabarito para posicionamento das medições de planicidade....	195
Figura C.2 – Fixação das peças no desempenho de granito .....	196
Figura C.3 – Realização das medidas de planicidade nas peças. ....	196
Figura C.4 – Ilustração dos pontos medidos .....	197
Figura C.5 – Visualização 3D das imperfeições do <i>dummy</i> D1 .....	200
Figura C.6 – Mapa com curvas de nível da planicidade do <i>dummy</i> D1.....	200
Figura C.7 - Visualização 3D das imperfeições do <i>dummy</i> D2.....	201
Figura C.8 - Mapa com curvas de nível da planicidade do <i>dummy</i> D2 .....	201
Figura C.9 - Visualização 3D das imperfeições do <i>dummy</i> D3.....	202
Figura C.10 - Mapa com curvas de nível da planicidade do <i>dummy</i> D3 .....	202
Figura C.11 - Visualização 3D das imperfeições do <i>dummy</i> D4.....	203
Figura C.12 - Mapa com curvas de nível da planicidade do <i>dummy</i> D4 .....	203
Figura C.13 - Visualização 3D das imperfeições do <i>dummy</i> D5.....	204
Figura C.14 - Mapa com curvas de nível da planicidade do <i>dummy</i> D5 .....	204
Figura C.15 - Visualização 3D das imperfeições do painel P1 .....	207
Figura C.16 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P1 .....	207
Figura C.17 - Visualização 3D das imperfeições do painel P2 .....	208
Figura C.18 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P2.....	208
Figura C.19 - Visualização 3D das imperfeições do painel P3.....	209
Figura C.20 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P3.....	209
Figura C.21 - Visualização 3D das imperfeições do painel P4 .....	210
Figura C.22 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P4.....	210
Figura C.23 - Visualização 3D das imperfeições do painel P5 .....	211
Figura C.24 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P5.....	211
Figura C.25 – Medidas de rugosidade nas peças .....	213
Figura C.26 – Pontos de medição da rugosidade superficial .....	214
Figura C.27 – Ilustração dos desvios máximos dos planos traçados .....	216

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais selecionados .....	22
Tabela 6.1 – Descrição dos modos de operação dos <i>dummies</i> .....	60
Tabela 6.2 – Descrição das fases do Teste 1 .....	63
Tabela 6.3 – Descrição das fases do Teste 2 .....	67
Tabela 7.1 – Duração dos testes executados .....	69
Tabela 8.1 – Valores de temperatura obtidos pelo TMM detalhado para validação da metodologia.....	89
Tabela 8.2 – Valores corrigidos para o Teste 2, Fase 4, apenas para o conjunto D5P4 (RTV566).....	90
Tabela 8.3 – Área individual e porcentagem da área total de cada uma das zonas.....	105
Tabela 8.4 – Sensores correspondentes a cada região .....	106
Tabela 8.5 – Fatores de normalização – Teste 1 .....	107
Tabela 8.6 – Média das diferenças de temperatura $dT_i$ normalizadas, Teste 1 .....	108
Tabela 8.7 - Desvio padrão da média das diferenças de temperatura $dT_i$ normalizadas, Teste 1 .....	109
Tabela 8.8 - Fatores de normalização – Teste 2.....	109
Tabela 8.9 - Média das diferenças de temperatura $dT_i$ normalizadas, Teste 2 .....	110
Tabela 8.10 – Desvio padrão da média das diferenças de temperatura $dT_i$ normalizadas, Teste 2 .....	110
Tabela 8.11 – Variação das diferenças de temperatura do Teste 1 para o Teste 2 .....	111
Tabela 8.12 – Média ponderada das diferenças de temperatura do Teste 1 para o Teste 2 .....	111
Tabela 8.13 – Médias das diferenças máximas, mínimas, Indicador 1 ( $\zeta_1$ ) e desvio padrão $\sigma_{\zeta_1}$ , Teste 1 .....	113
Tabela 8.14 - Médias das diferenças máximas, mínimas, Indicador 1 ( $\zeta_1$ ), Teste 2 .....	114
Tabela 8.15 – Indicador 2 ( $\zeta_2$ ) - Teste 1 .....	117
Tabela 8.16 – Indicador 2 ( $\zeta_2$ ) - Teste 2 .....	118
Tabela 8.17 – Média das diferenças de temperatura em vácuo e $P_{amb}$ para mesma potência aplicada.....	121
Tabela 9.1 – Principais submodelos e número de nós do TMM.....	126

Tabela 9.2 – Valores de acoplamento térmico calculados para a interface <i>dummy</i> -painel.....	136
Tabela 9.3 – Valores de ajuste de $h$ ( $W/m^2/^\circ C$ ) para o Teste 1, antes da ciclagem .....	147
Tabela 9.4 - Valores de ajuste de $h$ ( $W/m^2/^\circ C$ ) para o Teste 1, antes da ciclagem, com média ponderada na área das zonas .....	148
Tabela 9.5 – Média de $\mu_{h,pond}$ por conjunto .....	149
Tabela 9.6 – Valores ajustados de $h$ antes e depois da ciclagem térmica com alvo de $+20^\circ C$ no TRP .....	155
Tabela 9.7 - Valores ajustados de $h$ antes e depois da estocagem de seis meses, com alvo de $+20^\circ C$ no TRP .....	156
Tabela A.1 – Termopares do par Dummy1/Painel1 .....	171
Tabela A.2 - Termopares do par Dummy2/Painel2 .....	172
Tabela A.3 - Termopares do par Dummy3/Painel5 .....	172
Tabela A.4 - Termopares do par Dummy4/Painel3 .....	172
Tabela A.5 - Termopares do par Dummy5/Painel4 .....	172
Tabela A.6 – Descrição de cada conector.....	173
Tabela A.7 – Identificação dos pinos dos conectores .....	175
Tabela A.8 – Descrição e medidas dos <i>heaters</i> do experimento .....	177
Tabela A.9 – Identificação dos heaters e circuitos .....	178
Tabela B.1 – Constantes dos termistores .....	181
Tabela B.2 – Incerteza da potência expandida propagada para confiança de 95% .....	191
Tabela C.1 – Medidas para os <i>dummies</i> .....	197
Tabela C.2 – Medidas para os painéis .....	205
Tabela C.3 – Distância média entre os pontos correspondentes, em mm ....	212
Tabela C.4 – Valores de rugosidade medidos nos <i>dummies</i> e painéis.....	215
Tabela C.5 – Valores utilizados para cálculo de espessura mínima no exemplo da interface D1P1.....	218
Tabela C.6 – Valores de espessura mínima de material a ser aplicada em cada conjunto.....	219

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AWG	American Wire Gauge
CBERS	China-Brazil Earth Resources Satellite
CPU	Central Processing Unit
CVCM	Collected Volatile Condensable Materials
CVT	Câmara Vácuo-Térmica
DSC	Design and Construction Specification
ETE	Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial
EVS	Environmental Specification
HTC	Coeficiente de Transferência de Calor – <i>Heat Transfer Coefficient</i> (W/m <sup>2</sup> /K)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LIT	Laboratório de Integração e Testes
MLI	Multilayer Insulation
PCM	Phase-Change Material
RTV	Room Temperature Vulcanizing (silicone)
SMC	Shanghai Metal Corporation
TBT	Thermal Balance Test (Teste de Balanço Térmico)
TML	Total Mass Loss
TMM	Thermal Mathematical Model (Modelo Térmico Matemático)
TRP	Temperature Reference Point



## LISTA DE SÍMBOLOS

$q_i$	Fluxo de calor, $W/m^2$
$h_i$	Coefficiente de transferência de calor, $W/m^2/^\circ C$
$\Delta T_i$	Diferença de temperatura, $^\circ C$
$\mu_{dT}$	Média das diferenças de temperatura $dT_i$ , $^\circ C$
$\sigma_{dT}$	Desvio padrão das da média diferenças de temperatura $dT_i$ , $^\circ C$
$\zeta_1$	Indicador 1
$\zeta_2$	Indicador 2
$\Delta T_{max}$	Diferença de temperatura máxima, $^\circ C$
$\Delta T_{min}$	Diferença de temperatura mínima, $^\circ C$
$\mu_{\zeta_2}$	Média do Indicador 2
$\sigma_{\zeta_2}$	Desvio padrão da média do Indicador 2
D	Diâmetro, m
F	Força, N
A	Área, $m^2$
k	Condutividade térmica, $W/m/^\circ C$
t	Espessura, m
$\epsilon_0$	Critério para ajuste de diferenças de temperatura, $^\circ C$
$\epsilon_{N,IR}$	Emissividade no espectro infravermelho (tinta preta)
C	Calor específico, $J/kg/^\circ C$
m	Massa, kg
M	Torque, Nm
T	Temperatura, K
$T_d$	Temperatura média do <i>dummy</i> na interface, K
$T_p$	Temperatura média do painel na interface, K
$T_{TVC}$	Temperatura média do shroud da CVT, K
Q	Taxa de calor, W
q	Fluxo de calor, $W/m^2$
G	Condutância térmica $W/^\circ C$

$A_d$	Área de interface no <i>dummy</i> , m <sup>2</sup>
$A_p$	Área de interface no painel, m <sup>2</sup>
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, 5,67 X10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> /K <sup>4</sup>
$\varepsilon$	Emissividade no espectro infravermelho
$\hat{T}_d$	Temperatura de equilíbrio no <i>dummy</i> , K
$\hat{T}_p$	Temperatura de equilíbrio no painel, K
$\tau$	Constante de tempo,
$t_1$	Tempo no instante 1, s
$t_2$	Tempo no instante 2, s
$f$	Fator de ajuste da constante de tempo
$h_{eq}$	Máximo desvio em relação do plano na base do equipamento, m
$h_{pnl}$	Máximo desvio em relação do plano na área de montagem do painel, m
$L_{max}$	Maior dimensão na interface, m
$\bar{p}_{eq}$	Planicidade média na base do equipamento
$\bar{p}_{pnl}$	Planicidade média na área de montagem do painel
$R_{a,eq}$	Rugosidade média na base do equipamento, m
$R_{a,pnl}$	Rugosidade média na área de montagem do painel, m
$\delta_{IF,min}$	Espessura mínima de aplicação de material de interface, m



## SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>
1 INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Revisão Bibliográfica.....	5
2 MOTIVAÇÃO, OBJETIVOS E METODOLOGIA .....	17
2.1 Motivação e Contribuição do Trabalho Proposto .....	17
2.2 Objetivos .....	17
2.3 Metodologia.....	18
3 ESTUDO DOS MATERIAIS DE INTERFACE.....	21
3.1 Propriedades, Requisitos de Qualificação e Critérios de Escolha dos Materiais .....	21
3.2 Procedimentos de Aplicação.....	22
3.2.1 eGraf® Hitherm™ 1200 .....	22
3.2.2 Folha de Índio.....	24
3.2.3 Graxa Térmica.....	25
3.2.4 RTV 566 .....	27
4 ESTUDO EXPERIMENTAL DE ÁREA DE CONTATO .....	31
4.1 Motivação para estudo da área de contato .....	31
4.2 Dispositivo Transparente – Graxa Térmica .....	33
4.3 Dispositivo Transparente – RTV566.....	36
5 DESCRIÇÃO DO APARATO E CONFIGURAÇÃO DE TESTE .....	39
5.1 Aparato de Teste.....	39
5.2 Configuração de Teste .....	54
6 PLANEJAMENTO DOS TESTES .....	57
6.1 TMM Simplificado do Conjunto de Teste.....	57
6.2 Aplicação de Potência.....	59
6.3 Sequência de Teste – Teste1, com Ciclagem Térmica.....	61
6.4 Sequência de Teste – Teste2, 6 Meses de Armazenamento.....	65
7 REALIZAÇÃO DOS TESTES .....	69

7.1	Abordagem para a Execução dos Testes .....	69
7.2	Resultados Obtidos no Teste 1 .....	72
7.3	Resultados Obtidos no Teste 2 .....	74
8	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	79
8.1	Estimativa da Temperatura de Equilíbrio ( <i>Steady-State</i> ) a Partir de um Modelo Analítico .....	79
8.2	Mapas de Diferença de Temperatura.....	90
8.3	Normalização da Carga Térmica Aplicada .....	104
8.4	Razão das Diferenças Extremas de Temperatura $\Delta T_i$ – Indicador 1 ( $\zeta_1$ ) 112	
8.5	Variação nas Diferenças de Temperatura $\Delta T_i$ com Não Homogeneidade da Carga Aplicada – Indicador 2 ( $\zeta_2$ ) .....	115
8.6	Comparativo entre Vácuo e Pressão Atmosférica ( $P_{amb}$ ) .....	118
9	LEVANTAMENTO DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS DE CONTATO AO LONGO DAS INTERFACES .....	123
9.1	TMM Detalhado da Interface e Conjunto Experimental.....	123
9.2	Validação com Modelo Analítico para Cálculo da Condutância na Interface Sem Material.....	130
9.3	Resistência Térmica de Contato ao Longo da Interface Dividida em Zonas.....	137
9.4	Metodologia de Identificação e Ajuste de Valores Efetivos de Contato nas Zonas da Interfaces .....	141
9.5	Resultados de Identificação de Valores Efetivos de Contato nas Interfaces.....	146
9.6	Avaliação da Estabilidade do Contato Térmico .....	154
10	CONCLUSÕES.....	157
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	161
	APÊNDICE A – DETALHES DO APARATO DE TESTE .....	165
A.1	Termistores .....	165
A.2	Termopares.....	171
A.3	Conectores.....	173
A.4	Aquecedores ( <i>heaters</i> ).....	176

APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DOS TERMISTORES E ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	179
B.1 Correção Individual dos Termistores.....	179
B.2 Análise de Incertezas .....	186
B.2.1 Incertezas dos Termistores .....	187
B.2.2 Incertezas dos Aquecedores .....	190
B.3 Estudo Sobre Influência da Fiação dos Sensores.....	191
B.3.1 Fiação Atuando como Aleta Radiativa.....	192
B.3.2 Bloqueio Causado pela Fiação no Radiador .....	193
APÊNDICE C – ESTUDO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DAS PEÇAS	
195	
C.1 Mapeamento das Planicidades .....	195
C.2 Escolha dos Pares .....	212
C.3 Rugosidade.....	212
C.4 Metodologia de Cálculo de Espessura Mínima de Aplicação de Graxa Térmica e RTV566.....	215

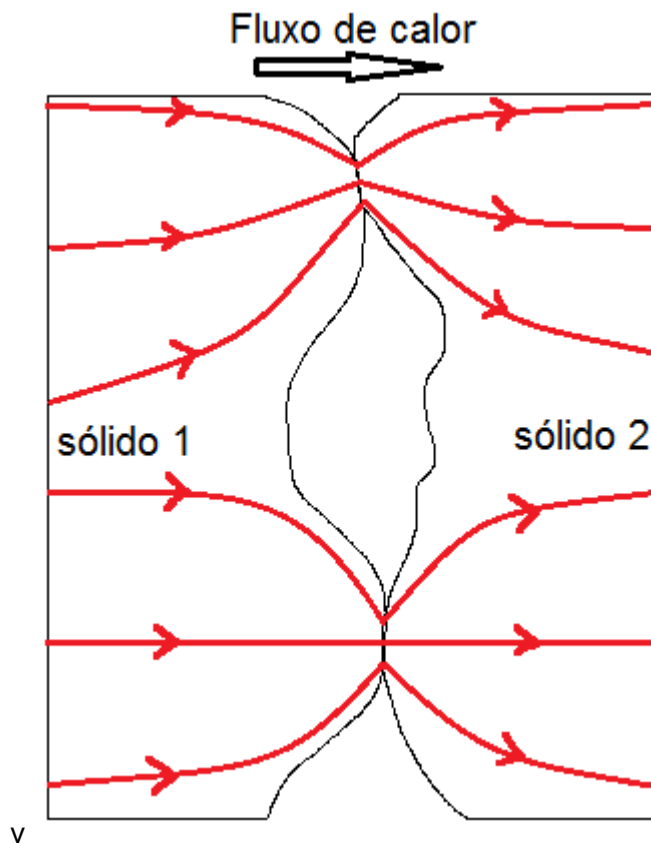


# 1 INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 Introdução

Quando dois sólidos são colocados em contato, existe condução de calor através desta interface. Porém, aparece uma resistência térmica de contato que é inerente às irregularidades e imperfeições de ambas as superfícies, como ilustrado na Figura 1.1.

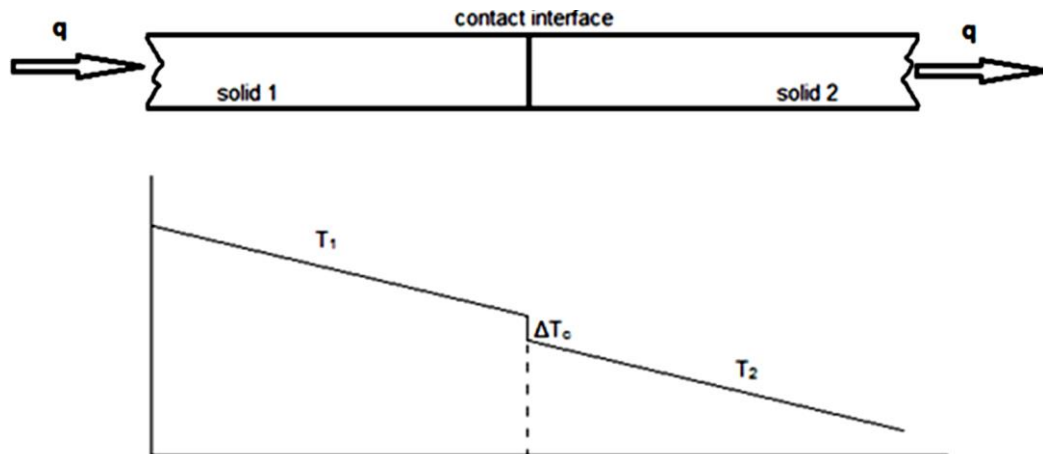
Figura 1.1 - Representação esquemática de dois sólidos em contato e o fluxo de calor na interface, mostrando a constrição das linhas.



Assim, a área efetiva de contato é sempre menor que a área da interface, provocando o efeito de constrição, ou seja, deformação nas linhas de fluxo de calor, o que faz com que surja um gradiente abrupto de temperatura entre dois sólidos em contato, mesmo que estes sejam do mesmo material. A Figura 1.2 mostra qualitativamente a distribuição de temperatura típica ao longo de dois sólidos de mesmo material e área de seção transversal em contato. Quando se observa o gráfico da distribuição de temperatura, nota-se claramente que na interface de

contato existe uma resistência térmica adicional, a qual é chamada de Resistência Térmica de Contato (RTC).

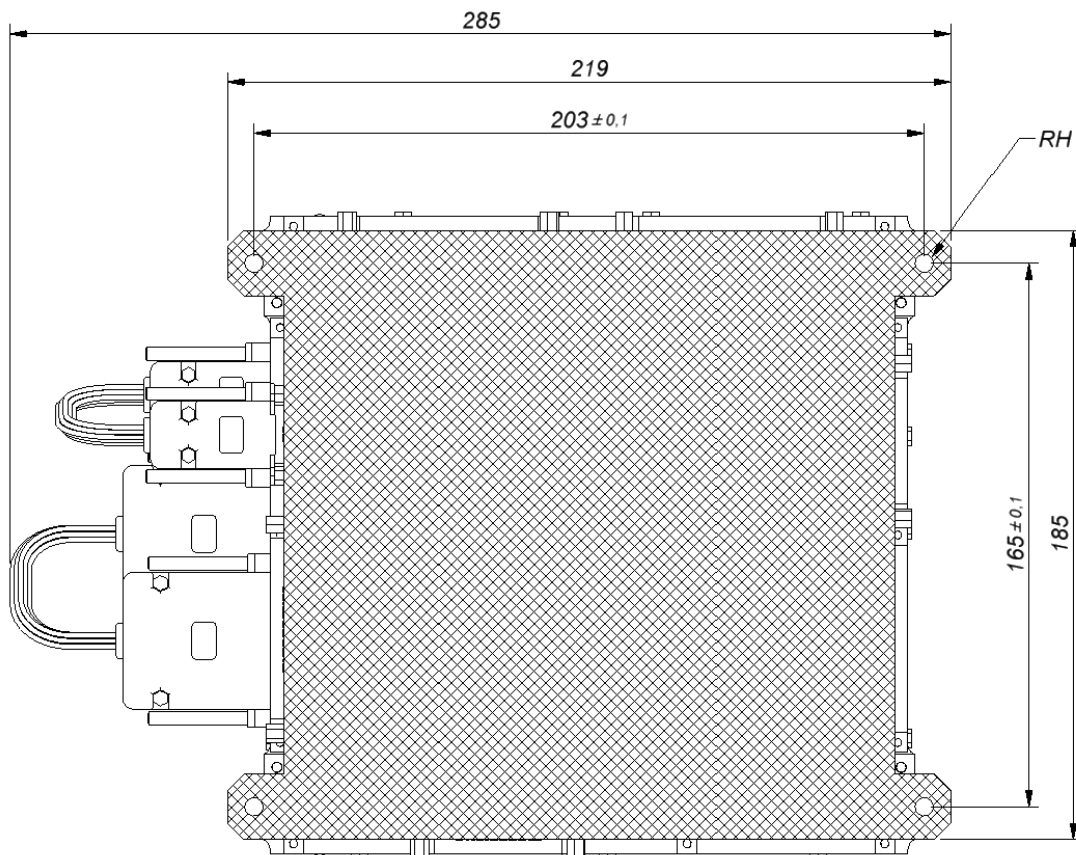
Figura 1.2 – Distribuição de temperatura ao longo de 2 sólidos do mesmo material em contato



Esta resistência térmica de contato é influenciada por alguns fatores como pressão de contato, acabamento das superfícies (rugosidade, ondulação e planicidade), propriedades mecânicas (deformações elásticas e plásticas) e finalmente a presença ou não de algum material na interface. Em aplicações espaciais, a ausência de ar na interface torna a resistência térmica maior.

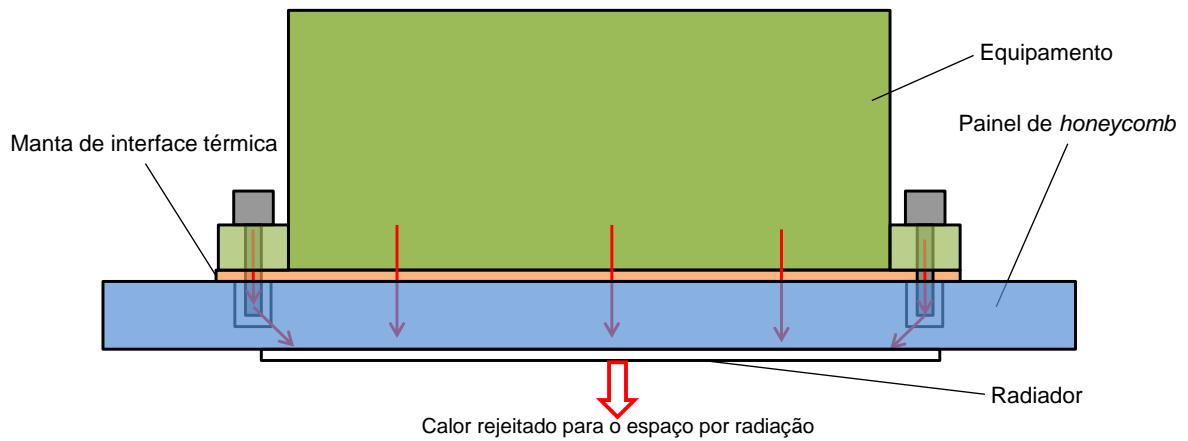
De acordo com Gilmore (2002), vários modelos foram desenvolvidos e são capazes de prever o comportamento térmico de interfaces de contato para casos específicos, não levando em conta interfaces que sofrem deformações quando parafusadas. Porém, existem poucos resultados experimentais para interfaces que apresentam montagem de equipamentos em painéis sanduíche com estrutura de *honeycomb*, o que é de uso comum em satélites. Esta interface é bastante complexa especialmente por causa da pequena espessura dos *facesheets* do painel e da rigidez limitada da base do equipamento, o que causa deformação de ambas as partes quando são parafusadas, normalmente somente nas bordas do equipamento, como é o caso exemplo do equipamento *MWT Subsystem Distribution Controller*, embarcado nos satélites da série CBERS, Figura 1.3.

Figura 1.3 – Base do equipamento *MWT SDC* utilizado nos satélites CBERS 3&4



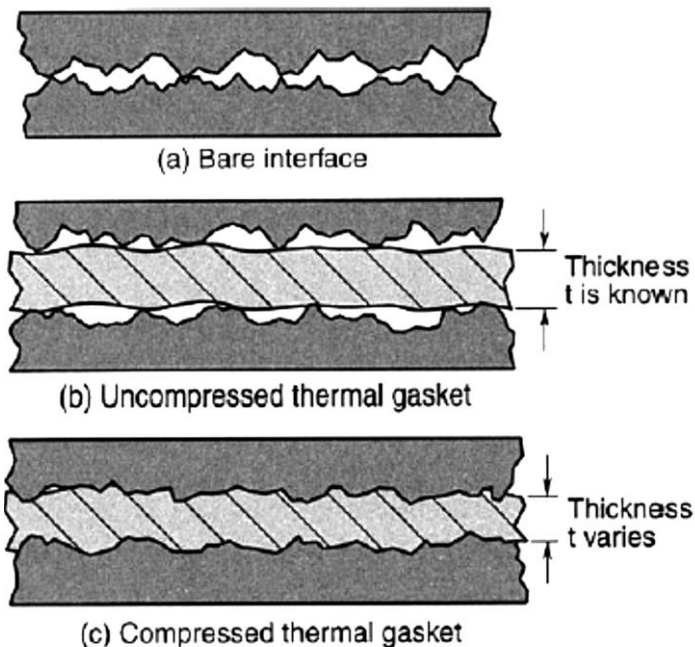
Estes equipamentos possuem componentes eletrônicos que dissipam calor e este precisa ser levado aos radiadores para que se possa manter a temperatura dos equipamentos dentro de seus limites. A maior parte desse calor é conduzida através da interface entre a base do equipamento e o painel onde ele está montado, uma vez que a troca de calor por radiação pela superfície externa do equipamento é bastante reduzida. Assim, esta interface se torna bastante crítica para o controle térmico do equipamento, sendo determinante na manutenção das temperaturas dentro dos limites estabelecidos. A Figura 1.4 apresenta esquematicamente o caminho para rejeitar o calor gerado pelo equipamento eletrônico para o caso em que o radiador está posicionado no painel de montagem do equipamento. Nota-se que o calor deve ser sempre conduzido através da interface parafusada entre o equipamento e o painel.

Figura 1.4 – Esquema do caminho térmico do calor gerado pelo equipamento



Para potencializar a transferência de calor do equipamento dissipativo para o painel, materiais especiais podem ser utilizados nessa interface. Esses materiais normalmente precisam de pressão para atuarem como acopladores térmicos entre duas superfícies. Na Figura 1.5 é mostrado esquematicamente uma interface sem material, com manta térmica sem pressão e com manta térmica com pressão.

Figura 1.5 – Interfaces sem material (a), com material sem pressão (b) e com material sob pressão (c)

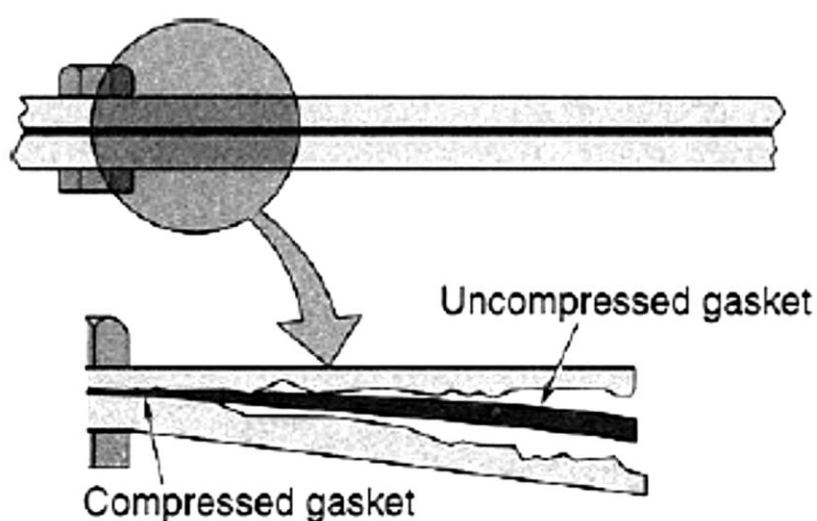


Fonte: Gilmore (2002).



Mesmo com o uso de material a falta de pressão na interface pode resultar em desacoplamento térmico entre as superfícies e gerar pontos quentes na base do equipamento e ainda não conseguir conduzir de forma efetiva todo o calor dissipado no equipamento fazendo com que o mesmo opere em temperaturas indesejadas. A Figura 1.6 mostra de forma exagerada o que acontece nas regiões distantes dos parafusos de fixação, resultando na falta de efetividade do material na interface.

Figura 1.6 – Representação esquemática da deformação na interface parafusada (exagerada)



Fonte: Gilmore (2002).

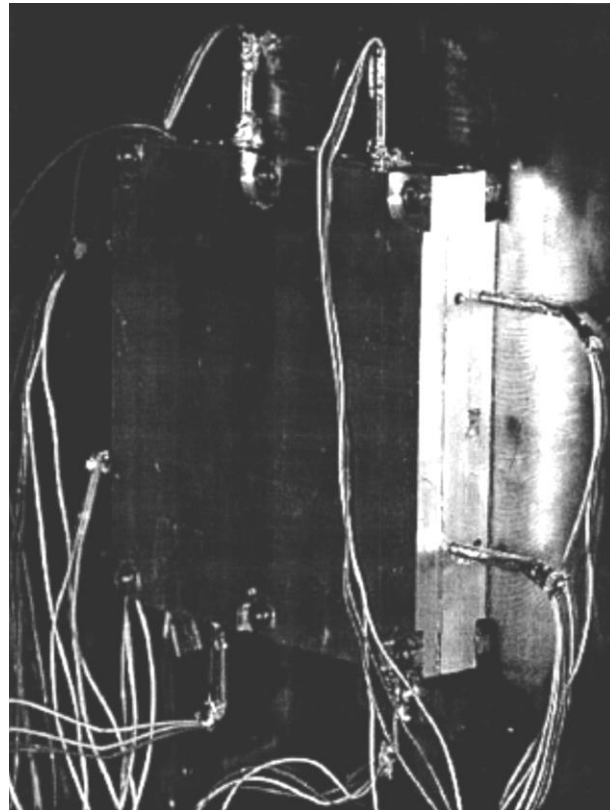
## 1.2 Revisão Bibliográfica

Nesta sessão, são apresentados e avaliados os estudos relacionados ao tema da proposta que já foram realizados.

Glasgow e Kittredge (2003) realizaram testes em vácuo de 20 diferentes configurações de interface, qualificados e não qualificados (incluindo interface sem material). O estudo dividiu os materiais nas categorias CHO-THERM e similares (flexíveis), grafite (rígido), folha de índio (metal), PCM e outros (alta viscosidade). O aparato de teste consistia em três placas de alumínio quadradas de lado 150 mm parafusadas a uma placa com refrigeração líquida e instrumentadas com quatro termistores cada, Figura 1.7. O estudo concluiu que o CHO-THERM, apesar de ser melhor que interface sem preenchimento, é um dos materiais menos eficientes. Provavelmente, a pressão do contato para este material não foi suficiente para

preencher todas as micro-cavidades (caso b da Figura 1.5), o que em vácuo fez com que boa parte da área da interface permanecesse sem contato. O grafite tem a tendência de melhorar o contato térmico com a espessura, folha de índio precisa de grandes pressões para conformar e preencher bem as irregularidades, PCM e Vel-Therm tiveram o melhor desempenho, porém PCM pode ter problemas com degasagem. Por fim, chega-se à conclusão que o material com melhor combinação de custo, facilidade de uso e desempenho é o T-ply 220. Contatos com painéis sanduíche de *honeycomb* e outras configurações de interfaces não foram investigados, e também a resistência de contato sobre área total de interface não foi mapeada.

Figura 1.7 – Configuração de teste – acoplamento com placa refrigerada.

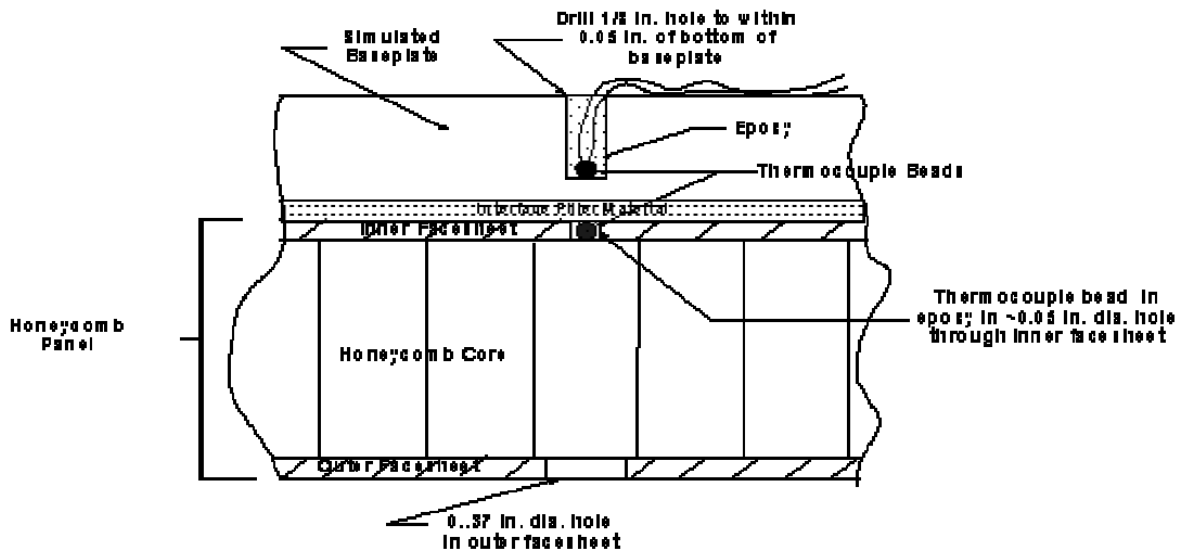


Fonte: Glasgow e Kittredge (2003)

Johnson (2007) apresentou um estudo sobre o desempenho térmico de RTV aplicado na interface da base equipamentos com estrutura de alumínio e painel de carbono em configuração de voo. Tanto os painéis como os simuladores de equipamentos foram instrumentados com sensores de temperatura próximos à

interface, Figura 1.8. As amostras foram submetidas a ciclos de temperatura sob vácuo. Um TMM detalhado foi criado com divisão de zonas na interface e valores diferentes de acoplamento térmico para cada zona foram ajustados com os dados experimentais. Os valores de condutância na interface apresentaram maiores valores quando estavam em temperaturas altas. Foi observada degradação de desempenho térmico nas amostras após serem submetidas a ciclos térmicos e quanto maior a amplitude de variação de temperatura, maior a degradação. O desempenho térmico do RTV cai bastante quando o material é submetido a baixas temperaturas. Existe relação do desempenho térmico com o coeficiente de expansão térmico. Entretanto, este tipo de painel, com *facesheet* de carbono, é utilizado em aplicações muito específicas em um satélite, como montagem de ótica de alta resolução. Portanto, os resultados obtidos não podem ser generalizados para aplicações usuais.

Figura 1.8 – Instrumentação do simulador de equipamento e painel.

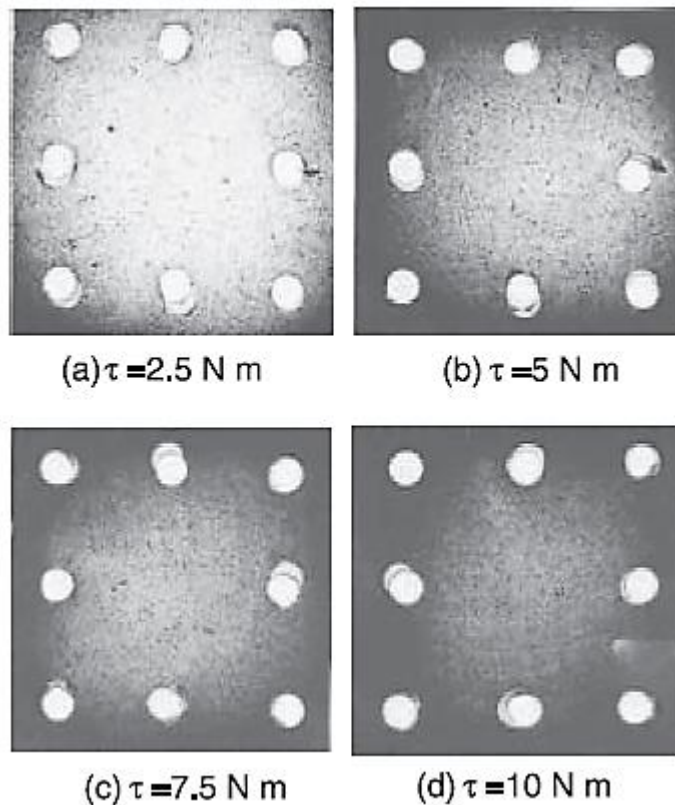


Fonte: Johnson (2007)

Yeh et al. (2001) apresentou uma investigação experimental sobre contato térmico em juntas parafusadas com blocos de alumínio 6061-T6 com dimensões de (63,5 x 63,5) mm e espessura de 50,0 mm. Foram testadas configurações com um parafuso, 4 parafusos e 8 parafusos, com torques variando de 1 a 10 N.m (a pressão de contato na interface foi mapeada utilizando filmes de medição de pressão, Figura 1.9). Um condutímetro foi utilizado para medir a resistência térmica de contato da

junta parafusada, tanto sem material de preenchimento como utilizando RTV em diferentes espessuras. O estudo conclui que a resistência de contato fica menor quando mais torque é aplicado nos parafusos e um maior número de parafusos é utilizado o aumento da rugosidade da superfície piora o contato. Quando se utiliza RTV a resistência térmica na interface diminui significativamente, porém, o aumento da espessura da camada de RTV faz com que a resistência aumente. Estes resultados são úteis para juntas parafusadas, mas não podem ser extrapolados para interfaces de equipamentos em painéis de satélites.

Figura 1.9 – Configuração com 8 parafusos, filmes sensíveis a pressão.

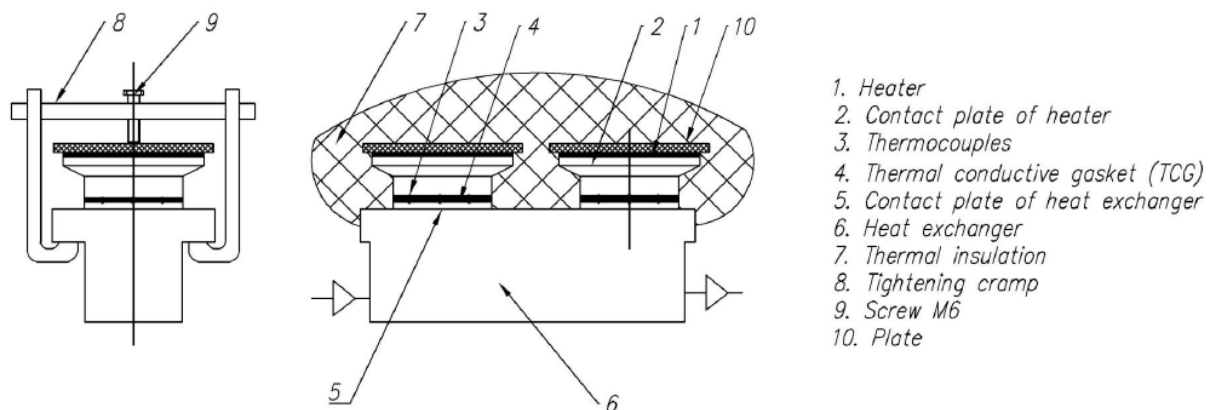


Fonte: Yeh et al. (2001)

Goncharov et al. (2000) realizaram um estudo experimental comparativo da resistência térmica de contato na interface de equipamentos e painéis *honeycomb* utilizando diferentes materiais de preenchimento. Porém, a interface utilizada nos testes não é representativa desse tipo de interface. Os materiais utilizados foram: carbono expandido, *carbon foil* (semelhante ao eGraf), THERM-A-GAP 579, CHO-TERM, SIGRAFLEKX e graxa térmica. Foi utilizado um condutímetro para medir a resistência térmica de contato com cada um dos materiais em regime permanente

com aplicações de carga de 0,05 a 0,3 MPa, Figura 1.10. O estudo conclui que um dos principais fatores que afetam a resistência térmica na interface é a carga aplicada, que quanto maior, melhor o contato. O material que obteve o melhor desempenho foi *carbon foil*, com valores de condutância de 12.000 a 24.000 W/m<sup>2</sup>K, dependendo da pressão aplicada em uma pequena área. O material que obteve o segundo melhor resultado foi SIGRAFLEKX, com condutância de até 18.450 W/m<sup>2</sup>K para compressão 0,3 MPa. Os outros materiais apresentaram desempenho inferior: carbono termicamente expandido de 6.000 a 8.000 W/m<sup>2</sup>K, THERM-A-GAP 579 de 6.900 a 8.000 W/m<sup>2</sup>K e CHO-TERM aproximadamente 8.000 W/m<sup>2</sup>K. Neste estudo os valores apresentados se referem a uma área pequena e a resistência de contato sobre a área total de interface não foi mapeada.

Figura 1.10 – Configuração do setup de teste para determinação da resistência térmica de contato.

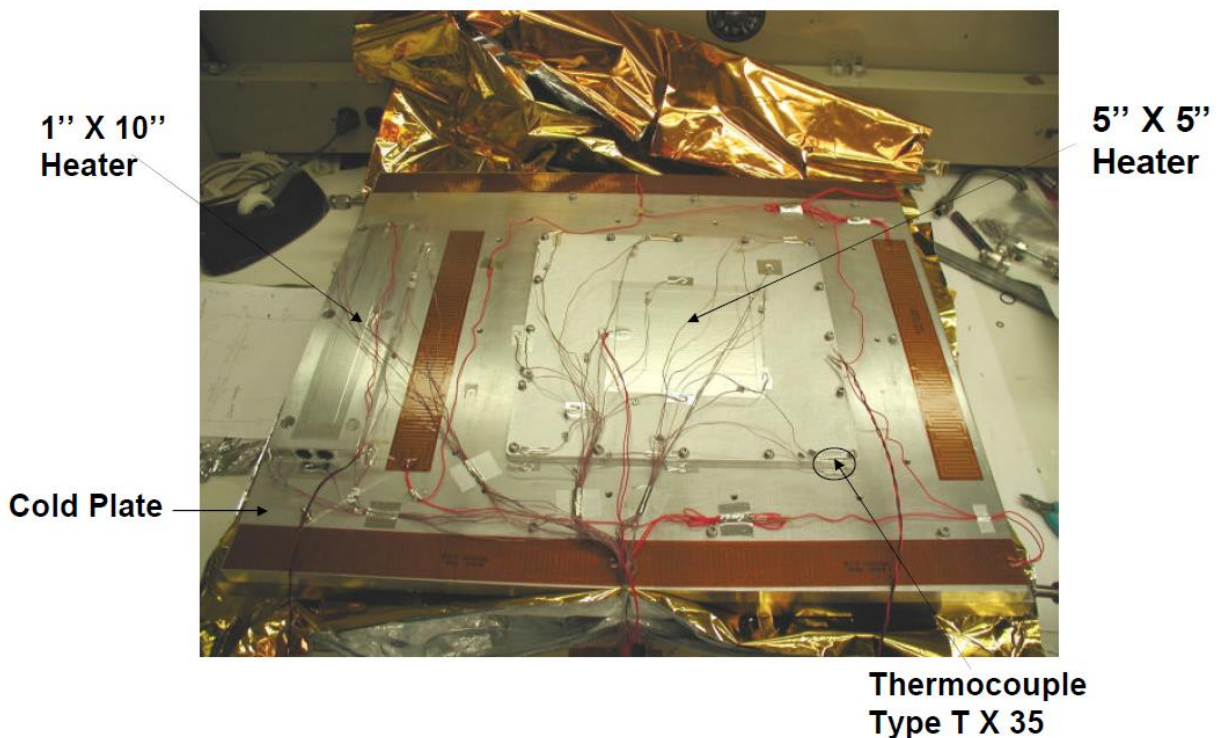


Fonte: Goncharov et al. (2000)

Rodriguez-Ruiz et al. (2008) apresentaram um estudo comparativo de materiais de interface térmicos sob condições de voo (em vácuo). Os materiais testados foram eGraf Hitherm-1210, Grafoil, ChoSeal-1285, Indium foil, NuSil CV-2946 e Arathane. Uma chapa de alumínio com dimensões 300 x 300 x 5 mm (com um aquecedor quadrado de lado 127 mm para simulação da carga térmica) foi montada em uma base com circulação de líquido e os materiais colocados nessa interface, Figura 1.11. Adicionalmente, um pequeno painel com tubos de calor foi montado na mesma base fria e os mesmos materiais foram instalados na interface. Os testes foram realizados com a base fria e quente, com dois níveis de potência nos aquecedores. As medidas da condutância na interface foram feitas para a região dos parafusos e

central. Neste teste comparativo, o material que obteve melhor desempenho térmico na região dos parafusos foi o eGraf e na região central foi o NuSil. Também, foi realizado um teste combinando dois materiais na mesma interface, folha de cobre na região dos parafusos (para atender requisitos de aterramento elétrico) e NuSil na região central. O desempenho térmico foi próximo do uso de apenas NuSil na interface. Por último, foi realizado um teste comparativo entre Teflon Spray (não-qualificado) e Teflon Sheet (qualificado). O desempenho do Teflon Spray foi melhor, porém não pode ser usado para aplicações espaciais devido a problemas de contaminação. Testes usando painéis de honeycomb não foram realizados.

Figura 1.11 – Configuração de teste, sem a manta de MLI.

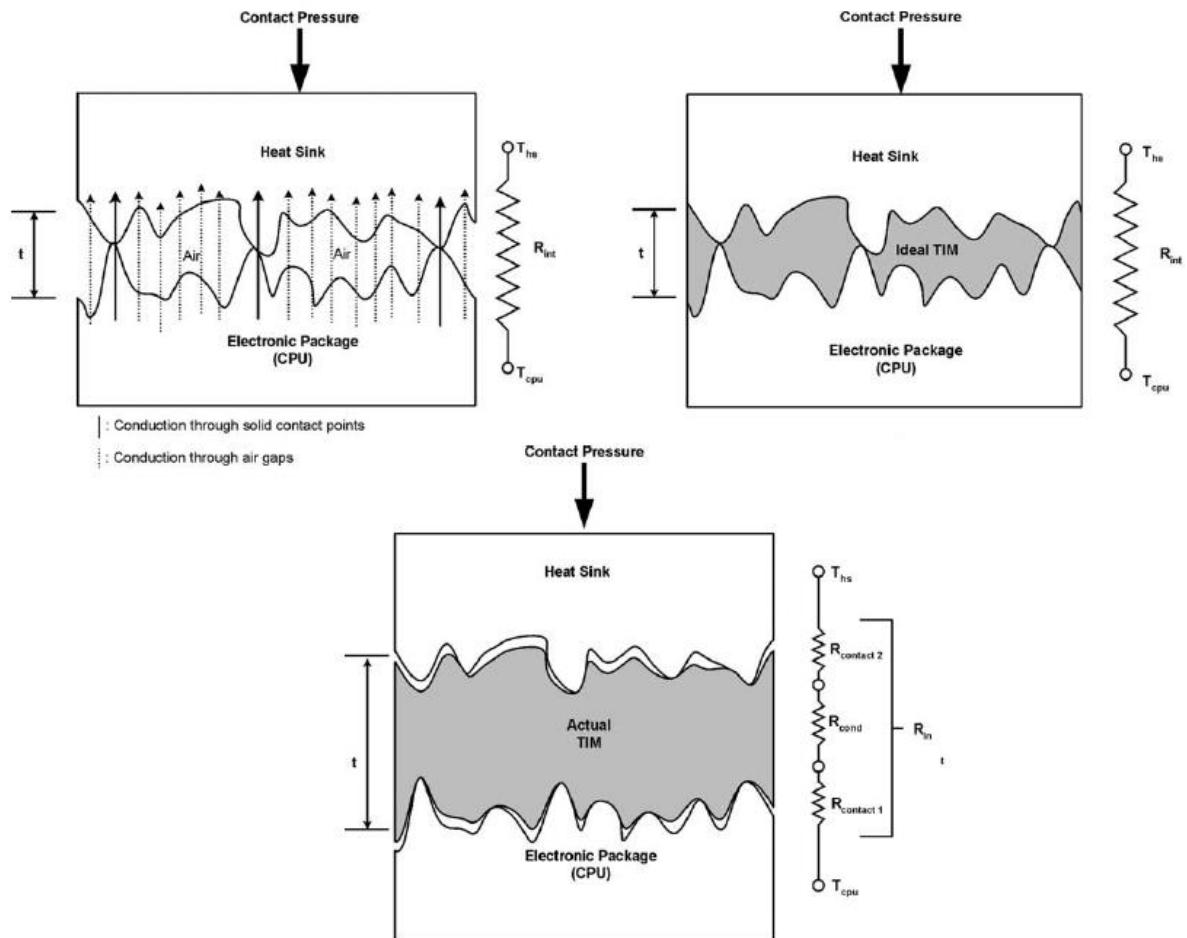


Fonte: Rodriguez-Ruiz et al. (2008)

Gwinn e Webb (2003) apresentaram um trabalho com fundamentos da performance térmica de materiais de interface, assim como uma avaliação dos materiais mais usados, especialmente em aplicações de resfriamento de CPUs de computadores pessoais. A Figura 1.12 mostra ilustrações esquemáticas da interface sem o uso de material em pressão atmosférica, com o uso de material ideal e real. O estudo conclui que a resistência térmica na interface (para processadores) é bastante sensível a planicidade, rugosidade e a pressão aplicada. Os melhores materiais para

esta aplicação foram considerados a graxa térmica e PCMs. Neste trabalho, o estudo sobre influência da planicidade pode ser útil para aplicações espaciais, enquanto os valores da resistência térmica obtidos podem ser diferentes para casos de funcionamento de equipamentos em vácuo.

Figura 1.12 – Ilustração de interface sem material (em pressão atmosférica), com material ideal e material real.



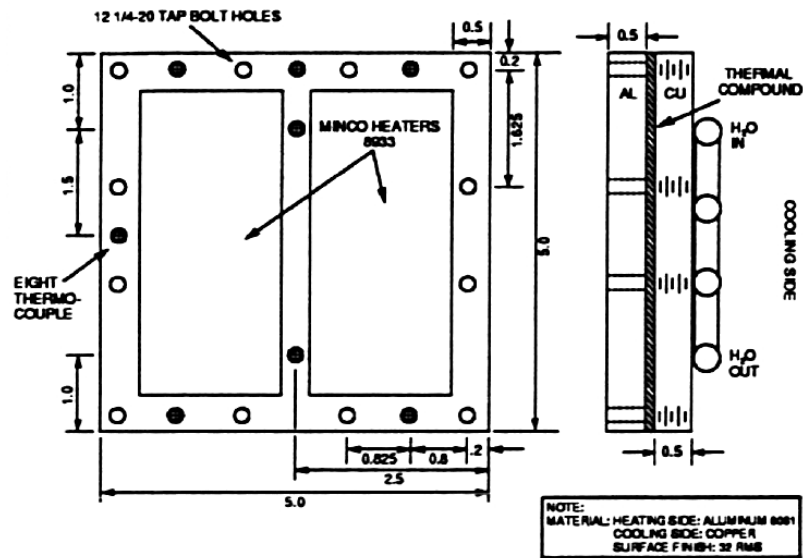
Fonte: Gwinn e Webb (2003)

Scialdone et al. (1992) realizaram um trabalho de avaliação de 2 materiais de interface térmicos; CHO-THERM 1671 (elastômero) e CV-2946 (RTV silicone condutivo). Os testes foram conduzidos com 2 tipos de configuração, com dimensões de 5"x5" firmemente apertada e de 8,5"x10" simulando o módulo de potência de um satélite real, ambas em vácuo e pressão atmosférica, Figura 1.13. A configuração em que a interface é rígida e firmemente parafusada apresenta desempenho térmico ótimo para ambos os materiais. Já na configuração que simula as condições de uso real, o desempenho térmico dos materiais é pior. O estudo

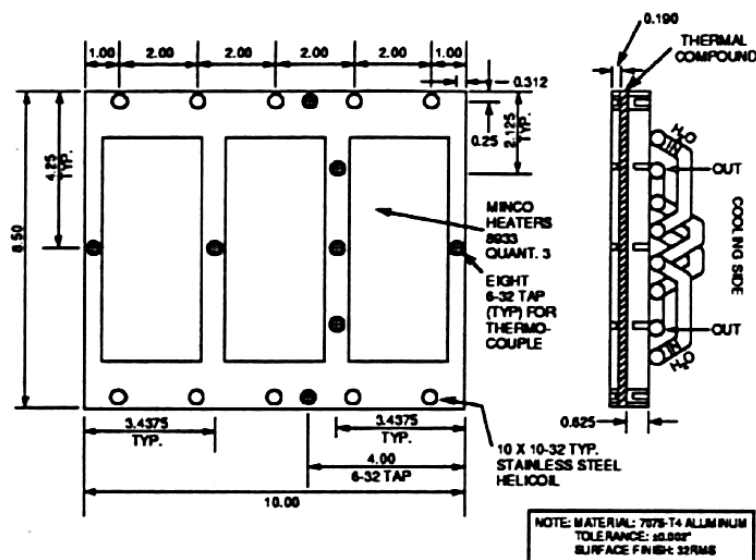
conclui que o CV-2946 apresenta condutância térmica maior que o CHO-THERM 1671 tanto em vácuo como em pressão atmosférica e é menos afetado pela pressão aplicada, porém, a sua aplicação é muito mais trabalhosa e requer mais cuidados. Os resultados apresentados são interessantes do ponto de vista comparativo entre os dois materiais, e do tipo de interface, reforçando que o desempenho térmico dos materiais é fortemente dependente do tipo de interface. Porém, não podem ser extrapolados para aplicações que tem montagem em painéis sanduíche de *honeycomb*.



Figura 1.13 – Configurações utilizadas no teste. (a) dimensões 5x5" e dois aquecedores; (b) dimensões 8,5x10" com 3 aquecedores – simulação do módulo de potência de um veículo espacial.



(a)



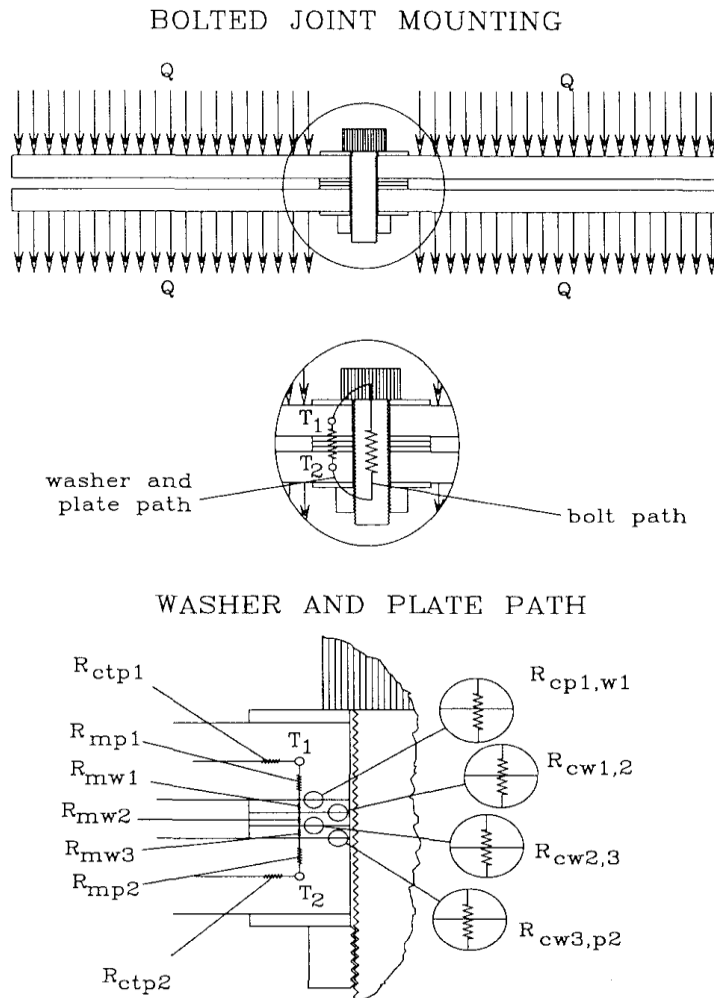
(b)

Fonte: Scialdone et al. (1992)

Mantelli et al. (1995) apresentam uma análise da resistência térmica de contato em juntas parafusadas em vácuo considerando dois modelos de resistência térmica de contato, um baseado em deformações elásticas e outro de deformações plásticas das superfícies em contato, Figura 1.14. O estudo conclui que, conforme esperado, a resistência de contato aumenta com a diminuição da pressão. Também, conclui que a diferença entre usar modelos que consideram deformações elásticas e plásticas não é maior que 4%, ou seja, é pequena. Isso ocorre porque o parâmetro de

deformação tem pouca influência na resistência térmica geral da interface. Estes resultados são úteis para juntas parafusadas, mas não podem ser extrapolados para interfaces de equipamentos de satélites.

Figura 1.14 – Esquema com as redes de resistências na junta parafusada.

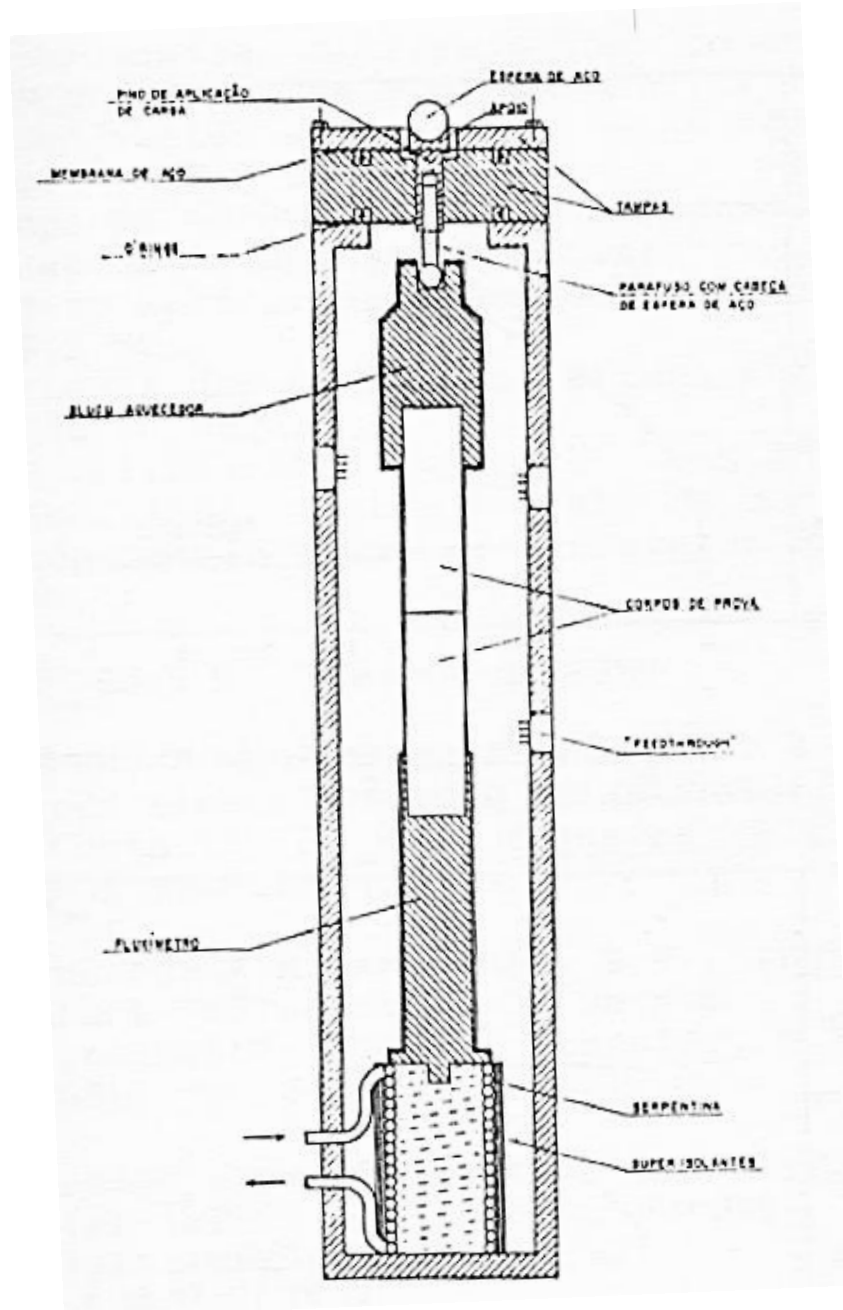


Fonte: Mantelli et al. (1995)

Garcia e Carajilescov (1989) apresentaram um trabalho com medidas experimentais de condutividade térmica e resistência térmica de contato sob vácuo. A Figura 1.15 mostra a configuração do teste. São apresentadas todas as informações de projeto, construção e calibração do aparato utilizado para realizar as medidas, assim como a metodologia adotada. As medidas de resistência na interface de contato foram feitas para pressão variando de zero a 8,5 MPa. Para valores acima de 2,0 MPa, a pressão afeta linearmente a resistência (inversamente proporcional), porém quando a pressão é pequena, observou-se que os resultados não são repetitivos devido a

deformações plásticas causadas por pressões elevadas. Os resultados obtidos com o aparato estão de acordo com o que a literatura apresenta, portanto, está qualificado para ser utilizado.

Figura 1.15 – Configuração do teste, condutímetro dentro da câmara de vácuo.

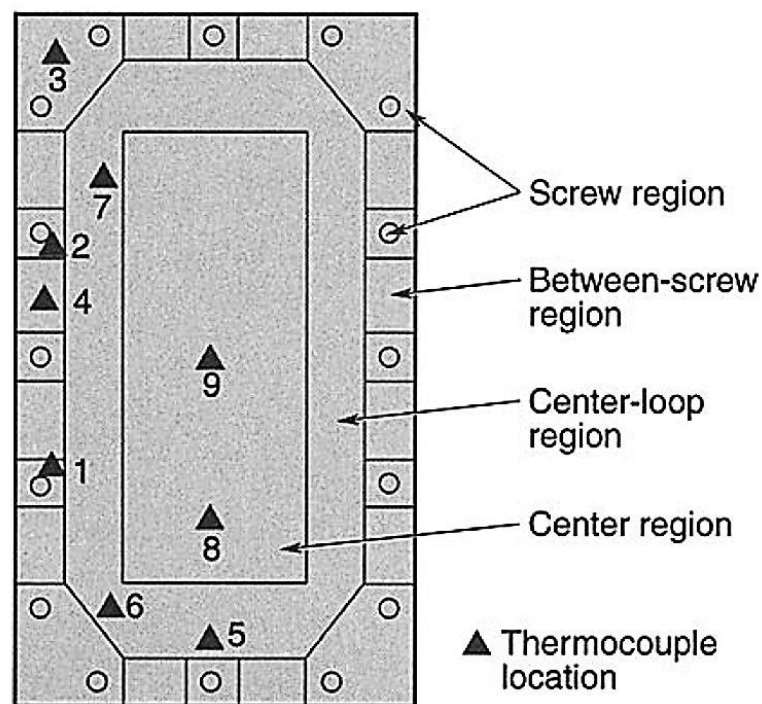


Fonte: Garcia e Carajilescov (1989)

Welch e Rutter (1989) apresentaram um estudo experimental com análise computacional do comportamento térmico do material *Calgraph* em uma interface de

duas peças de alumínio 6063-T6 com dimensões 280 x 152 x 8 mm, parafusadas no perímetro com 16 parafusos, semelhante a montagem dos equipamentos em satélites. A interface tinha um aquecedor e isolamento com manta MLI de um lado e uma placa fria do outro para promover um fluxo de calor ao longo da interface contendo o material, com testes realizados em câmara de vácuo. Foi apresentado o conceito de dividir a interface em regiões típicas de acordo com a resistência térmica e instrumentação, Figura 1.16.

Figura 1.16 – Conceito de regiões típicas na interface.



Fonte: Welch e Rutter (1989).

O estudo apresentou valores comparativos de taxas de transferência de calor em interface sem material e com *Calgraph*, que mostrou aumentar o contato em 2 a 3 vezes na região dos parafusos, mas sem melhora na região central. Os valores de coeficiente de transferência de calor observados para a interface com *Calgraph* variaram de 34,0 a 7,9 W/(m<sup>2</sup>°C) na região central e dos pés, respectivamente. Os autores concluíram que o material do estudo não é adequado para substituir o RTV na montagem de equipamentos. Este estudo apresenta pela primeira vez o conceito de dividir a interface em regiões típicas de acordo com magnitude da resistência térmica de contato. Este conceito é importante e será usado no presente trabalho para otimização da instrumentação.

## 2 MOTIVAÇÃO, OBJETIVOS E METODOLOGIA

### 2.1 Motivação e Contribuição do Trabalho Proposto

No projeto térmico de satélites, uma das dificuldades encontradas é a determinação do acoplamento térmico na interface entre os equipamentos e painéis estruturais e escolher o melhor material a ser aplicado no interface para melhorar o contato térmico. Os valores adotados de coeficiente de transferência de calor no contato, na prática são normalmente derivados dos limites extremos, a favor da segurança.

Não foi encontrado nenhum estudo experimental com testes de configurações de interfaces reais usadas em satélites em vácuo. A caracterização de diferentes materiais sob condições reais de voo em níveis de temperatura de qualificação de equipamentos também não foi encontrada da bibliografia.

A proposta deste trabalho é gerar um conjunto inédito de dados experimentais que, combinados com análise em TMMs detalhados, revelem dados de desempenho térmico comparativo dos diferentes materiais de interface térmica qualificados. O estudo inclui a obtenção de mapas de distribuição de resistência térmica ao longo de área de contato com influência da temperatura em vácuo, estabilidade de contato depois ciclos térmicos e estocagem.

### 2.2 Objetivos

O trabalho tem como principais objetivos:

- a) Desenvolvimento de um aparato de testes inovador que permita reproduzir a interface térmica típica entre equipamentos eletrônicos e painéis sanduíche de *honeycomb* de satélites para que múltiplos materiais de interface térmicos possam ser testados simultaneamente em vácuo em condições equivalentes;
- b) Desenvolvimento de Modelos Térmicos Matemáticos (TMM) detalhados da interface, assim como o do conjunto experimental completo, com parametrização que permite revelar os valores de coeficientes de transferência de calor locais a partir dos dados experimentais;
- c) Estudo experimental de distribuição da resistência térmica de contato nas interfaces com diferentes materiais;

- d) Estudo experimental da resistência térmica de contato em vácuo nas interfaces como função da temperatura dentro dos limites de qualificação de equipamentos eletrônicos;
- e) Estudo de estabilidade no desempenho térmico de diferentes materiais de interface após serem submetidos a ciclos de temperatura;
- f) Estudo de estabilidade no desempenho térmico de diferentes materiais de interface após estocagem de seis meses;
- g) Estudo da influência de não homogeneidade da dissipação térmica na interface sobre a resistência de contato;
- h) Identificação e quantificação da distribuição da resistência térmica de contato ao longo da interface entre equipamentos e painéis de satélites com o ajuste de Modelo Térmico Matemático (TMM);

### **2.3 Metodologia**

A metodologia do estudo consiste em:

- a) projetar e construir o aparato de testes que permita testar, em vácuo, 5 interfaces entre equipamentos e painéis de satélites em condições térmicas equivalentes em vácuo;
- b) executar os testes em Câmara Vácuo-Térmica a fim de impor patamares de temperatura dentro dos limites de qualificação de equipamentos eletrônicos;
- c) analisar e tratar os dados experimentais a fim de identificar efeitos e tendências em função da temperatura, ciclos térmicos e estocagem;
- d) desenvolver um Modelo Térmico Matemático (TMM) detalhado e representativo da interface a ser ajustado com os dados experimentais para revelar valores de resistência térmica de contato ao longo da interface em cada fase dos testes, para cada tipo de material, uma vez que o TMM consegue reproduzir o campo de fluxo de calor do experimento;

- e) realizar estudos experimentais adicionais para elucidar e melhorar o entendimento dos valores e tendências das resistências de contato obtidos;
- f) repetir a sequência de testes após estocagem de 6 meses.





### **3 ESTUDO DOS MATERIAIS DE INTERFACE**

Materiais que melhoram a transferência de calor na interface entre equipamentos e painéis de satélites devem ser capazes de conduzir com maior eficiência o calor de uma superfície para a outra. Assim, basicamente 3 propriedades entram em jogo para compor o desempenho do material: i. condutividade térmica; ii. espessura de aplicação; iii. capacidade de preencher as imperfeições das superfícies. Elas afetam o desempenho da seguinte forma:

- i. quanto maior a condutividade térmica maior o acoplamento térmico;
- ii. quanto menor a espessura de aplicação maior o acoplamento térmico;
- iii. quanto maior a capacidade de preencher as imperfeições, maior o acoplamento térmico. Neste caso, algumas propriedades mecânicas entram em jogo como dureza, elasticidade, estado sólido ou líquido, viscosidade, etc.

A pressão de contato é um fator externo muito importante, que no geral melhora significativamente o contato térmico.

#### **3.1 Propriedades, Requisitos de Qualificação e Critérios de Escolha dos Materiais**

Todo material a ser utilizado em um satélite, deve cumprir requisitos de degasagem (TML e CVCM) em vácuo estabelecidos pelas normas de qualificação espacial, usualmente  $TML < 1\%$  e  $CVCM < 0,1\%$ . Este requisito é muito importante para não contaminar instrumentos óticos e o restante do satélite, assim como os meios de teste e limita significativamente o número de materiais disponíveis.

Existem alguns materiais qualificados que já foram utilizados em missões espaciais reais, porém, os mais frequentemente utilizados e que foram escolhidos para o estudo foram: eGraf® Hitherm™ 1200, folha de índio, graxa térmica e RTV566. O principal critério utilizado para a seleção dos materiais foi o histórico de uso em voo de missões espaciais, especialmente em satélites de sensoriamento remoto de órbita baixa, assim como os construídos atualmente no INPE.

Serão utilizados os quatro diferentes tipos de materiais de interface, um para cada conjunto. Também haverá uma amostra de referência, montado sem nenhum

material de interface, com o mesmo padrão de montagem dos demais. A Tabela 3.1 apresenta a descrição e as principais propriedades dos materiais utilizados no estudo, informadas pelos fabricantes.

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais selecionados

Conjunto	Material	Fabricante	Espessura (mm)	Condutividade térmica (W/(m°C))	CTE (ppm/°C)
D1/P1	Sem material	-	-	-	-
D2/P2	eGraf® Hitherm™ 1200	Graftech	0,25	10,0 / 150,0**	0,4 / 27,0
D3/P5	Indium foil (99.995%)	SMC	0,20	~90,0	29,0
D4/P3	Graxa térmica	Dow corning	0,20*	0,7	-
D5/P4	RTV566 (cured-in)	Momentive	0,20*	0,3	160,0

\*espessura controlada no momento da aplicação.

\*\*material anisotrópico  $k_{transv}/k_{plano}$ .

### 3.2 Procedimentos de Aplicação

Os resultados de estudos de resistência térmica de interfaces térmicas podem ser influenciados pelo método de aplicação. Partindo do pressuposto que os procedimentos para aplicação dos materiais de interface já são bem estabelecidos, apenas uma pequena investigação sobre os métodos de aplicação foi conduzida, uma vez que o objetivo principal do estudo é avaliar comparativamente o desempenho térmico dos diferentes materiais com o procedimento de aplicação já estabelecido e amplamente utilizado na integração de satélites.

#### 3.2.1 eGraf® Hitherm™ 1200

O eGraf® Hitherm™ 1200 é um material a base de grafite, sendo comercializado na forma de manta com formato 300 x 300 mm e espessura escolhida de 0,25 mm. A Figura 3.1 mostra uma ilustração do fabricante *GrafTech International* fazendo referência à alta condutividade no sentido transversal da manta. Este material foi utilizado no famoso telescópio espacial *Hubble*, como interface térmica de alguns equipamentos eletrônicos.

Figura 3.1 – Ilustração do eGraf® Hitherm™ 1200



Fonte: Graftech (2018)

A forma de aplicação é a mais fácil dentre os materiais testados, pois a manta já vem com adesivo em uma das faces, facilitando o seu posicionamento seja na base do equipamento ou na região onde o mesmo será montado no painel. Basta posicionar a manta na região desejada e assentar a mesma com o uso de uma espátula de teflon, montar o equipamento no painel e cortar o excesso de material nas bordas. A Figura 3.2 mostra a instalação do material na base do *dummy* utilizado nos testes deste trabalho.

Figura 3.2 - Instalação do eGraf® Hitherm™ 1200



### 3.2.2 Folha de Índio

As folhas de índio, por não apresentarem problemas de degasagem, têm histórico de voo, especialmente como material de interface de equipamentos próximos às partes sensíveis do satélite, como é o caso das câmeras dos satélites do programa CBERS.

Comercialmente as folhas de índio são produzidas com diferentes espessuras e tamanhos. A folha utilizada no estudo tem 99.99% de pureza, fabricado pela SMC Shanghai Metal Corporation em formato de tira com 0,20 mm espessura e dimensões de 400 x 35 mm, o que facilita a instalação. A Figura 3.3 mostra uma fotografia ampliada de uma folha de índio.

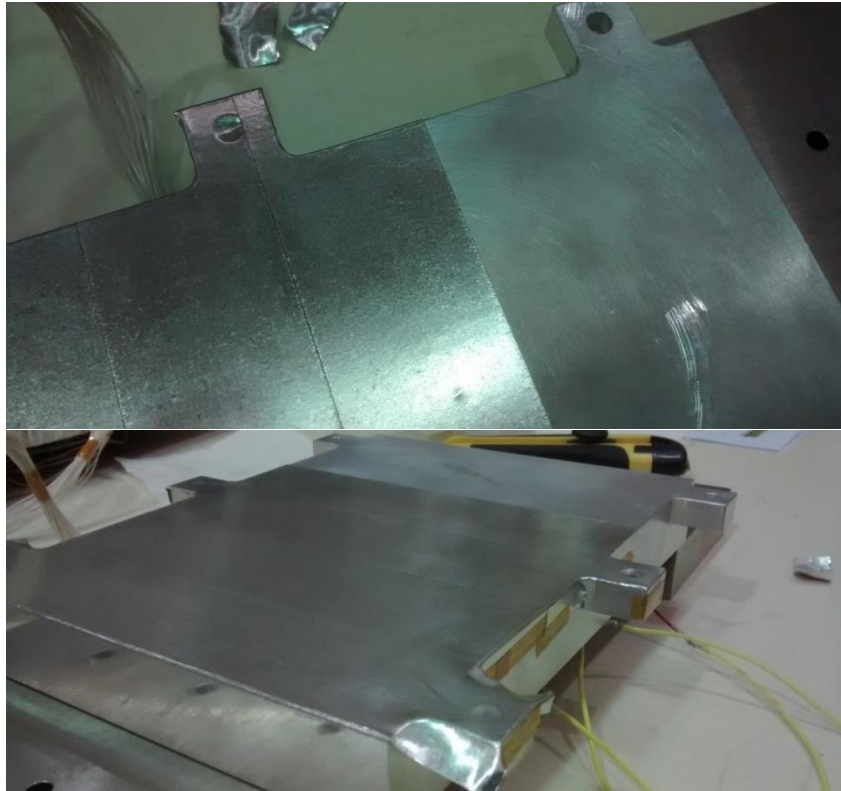
Figura 3.3 – Folha de índio com largura de 1”



Fonte: Surepure (2018)

A aplicação das folhas consiste na formação de um mosaico com as tiras a fim de cobrir toda a superfície de interface entre a base do equipamento e o painel, nunca deixando sobreposição de material, conforme ilustrado na Figura 3.4. As folhas devem ser alisadas com o auxílio de uma espátula de *Teflon* a fim de evitar rugas.

Figura 3.4 – Aplicação de folha de índio na base do *dummy*



### 3.2.3 Graxa Térmica

A graxa térmica tem um largo histórico de utilização como material de interface em satélites, especialmente nos satélites da família CBERS.

No presente estudo, foi utilizada a graxa térmica qualificada para uso em vácuo *Dow Corning 340 HS compound*, Figura 3.5.

Figura 3.5 – Graxa térmica 340 HS compound



Fonte: Cromwell (2018)

Usualmente, a graxa térmica é aplicada com espessura única e controlada ao longo de toda a interface. Mais de uma técnica pode ser utilizada para seguir esta abordagem.

O material foi aplicado com espessura controlada de 0,20 mm. O método de aplicação utilizado foi através de linhas de náilon com seção transversal redonda de diâmetro 0,20 mm. O excesso de graxa foi retirado com uma espátula larga e plana a fim de aplicar uma camada homogênea com a espessura desejada, Figura 3.6.

Figura 3.6 – Aplicação da graxa térmica



Uma desvantagem clara da graxa térmica é a sua manipulação e aplicação, uma vez que acaba impregnando na borda dos equipamentos e painéis, também nas roscas dos insertos e parafusos. Como não sofre o processo de cura, a graxa permanece fluida indefinidamente. Entretanto, faltam estudos sobre degradação da graxa aplicada durante longo período, o que poderia causar diminuição no desempenho térmico.

### 3.2.4 RTV 566

A resina à base de silicone RTV566 é considerada padrão como material de interface de equipamentos de satélites, com largo histórico de voo. Este material está sendo usado no satélite brasileiro Amazonia-1. A resina utilizada no estudo é do fabricante *Momentive*, Figura 3.7.

Figura 3.7 – RTV 566 Momentive



Fonte: Momentive (2018)

Primeiramente se faz a pesagem e mistura da base de *RTV566* com o catalizador, como ilustrado na Figura 3.8, seguida da degasagem da mistura em vácuo para eliminar bolhas de ar introduzidas à mistura durante o processo.

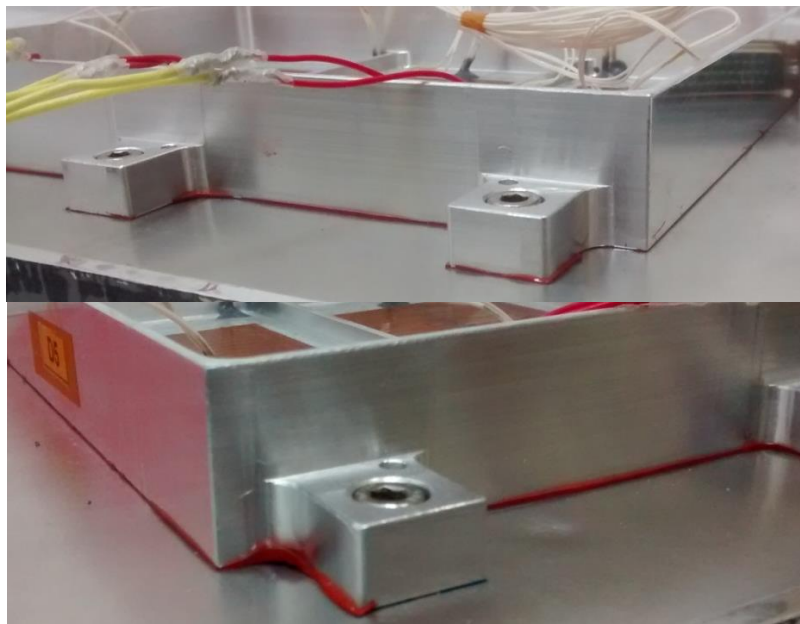
Figura 3.8 – Mistura de resina com catalisador é realizada com o uso de uma balança



Da mesma forma da graxa térmica, O RTV 566 é fluido e foi aplicado com espessura de 0,20 mm. O método de aplicação utilizado foi o mesmo da graxa térmica, através de linhas de náilon de diâmetro 0,20 mm. O excesso de RTV566 também foi retirado com uma espátula larga e plana a fim de aplicar uma camada homogênea com a espessura desejada. Neste caso, o equipamento deve ser montado imediatamente para que a cura ocorra no local, e o excesso que fica para fora nas bordas pode ser cortado facilmente após a cura completa, Figura 3.9. Os fios de náilon são removidos antes da montagem.



Figura 3.9 – Aplicação de RTV566 – corte do excesso nas bordas





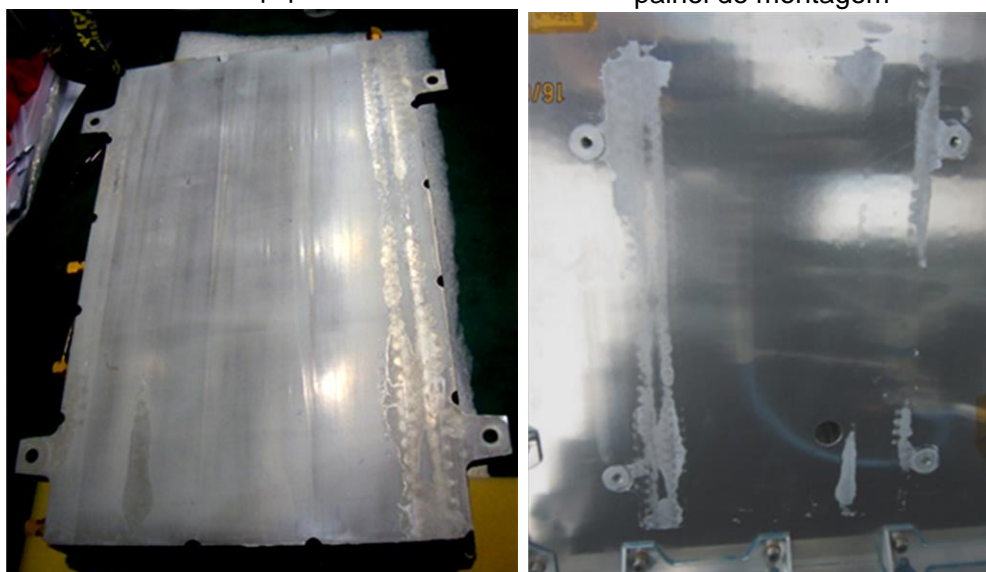
## 4 ESTUDO EXPERIMENTAL DE ÁREA DE CONTATO

### 4.1 Motivação para estudo da área de contato

Existe um importante fator, o qual pode afetar a resistência térmica de contato na interface de um equipamento com o painel do satélite de forma significativa. Trata-se da área de contato real na interface através do material, a qual é comum ser menor que a área total do *footprint* do equipamento. Mesmo assim, existem poucos estudos que levam em consideração esta questão. Com o objetivo de avaliar a área de contato efetiva da graxa térmica e RTV566, os quais têm metodologias de aplicação semelhante, uma investigação foi realizada. O estudo também foi motivado pelo histórico da identificação de falta de contato em grandes áreas quando estes materiais são aplicados, tanto no satélite CBERS como no Amazonia-1.

Para exemplificar a gravidade do problema, a Figura 4.1 mostra claramente que uma grande área da base do equipamento ficou sem contato com o painel devido à espessura insuficiente na aplicação da graxa térmica, durante a campanha de AIT do satélite CBERS 3 em 2012, após a interrupção do teste causada por problema de temperatura a desmontagem de um dos equipamentos.

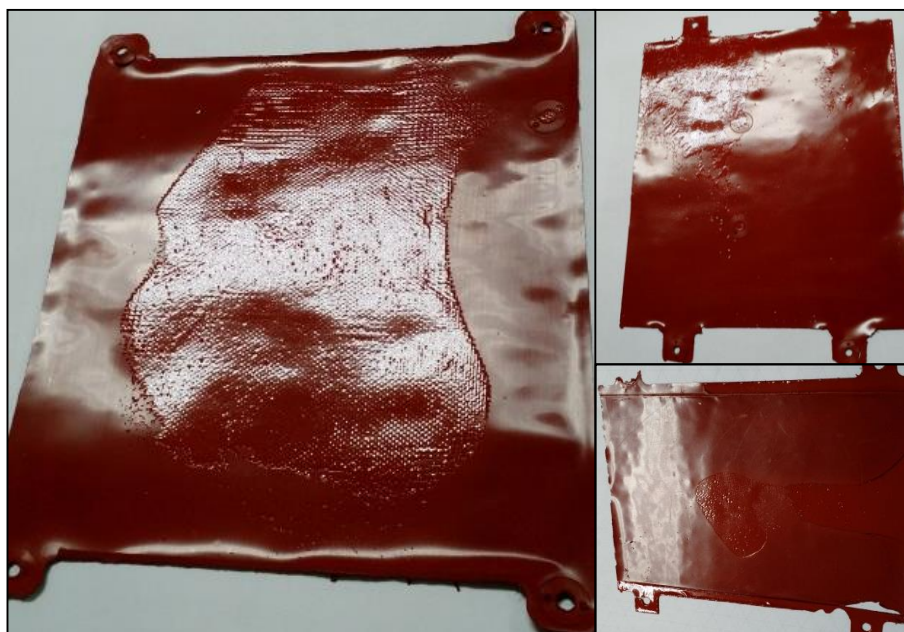
Figura 4.1 – Equipamento e painel do satélite CBERS 3, após desmontagem em 2012  
base do equipamento                      painel de montagem



Neste caso, fica evidente que a graxa térmica não estava cumprindo a sua função na melhora do acoplamento térmico entre o equipamento e o painel de montagem. Isso gera aquecimento indesejado e inesperado do equipamento, em condições de vácuo, uma vez que o projeto térmico tenha sido desenvolvido considerando o acoplamento melhorado e o problema só foi revelado durante o teste.

A mesma problemática foi observada durante a campanha de testes de qualificação da maquete térmica do satélite Amazonia-1, neste caso com o uso de RTV566. A Figura 4.2 mostra algumas mantas retiradas da interface de alguns equipamentos desmontados após o TBT.

Figura 4.2 - Mantas de RTV566 mostrando falta de contato em alguns regiões

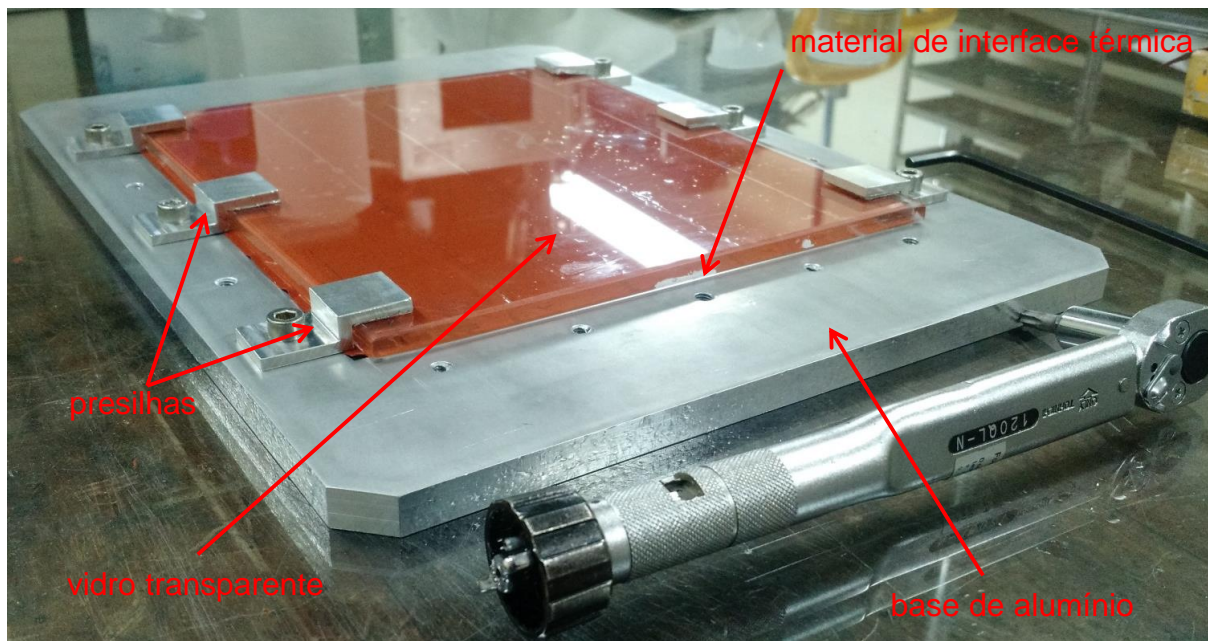


Para avaliar este fenômeno para a dimensão do *dummy* de equipamento utilizado nos testes, dentro do escopo do presente trabalho desenvolveu-se um dispositivo que permitisse a visualização da área real do contato após a aplicação, sem a desmontagem da interface, relevando assim a real condição de contato durante a montagem.

O dispositivo é composto por uma chapa de alumínio de 10 mm com roscas dispostas no perímetro de montagem, uma placa de vidro temperado de 6 mm de espessura que é montada na chapa e fixada através de presilhas de alumínio, as quais permitem aplicar torque nos parafusos e transferir para o vidro nos pontos de

fixação do equipamento. A Figura 4.3 apresenta o dispositivo com seis presilhas parafusadas com torque especificado de 5 N.m para parafusos M5, de acordo com o DCS do CBERS 04A.

Figura 4.3 – Aparato utilizado para avaliar a aplicação de graxa térmica e RTV566

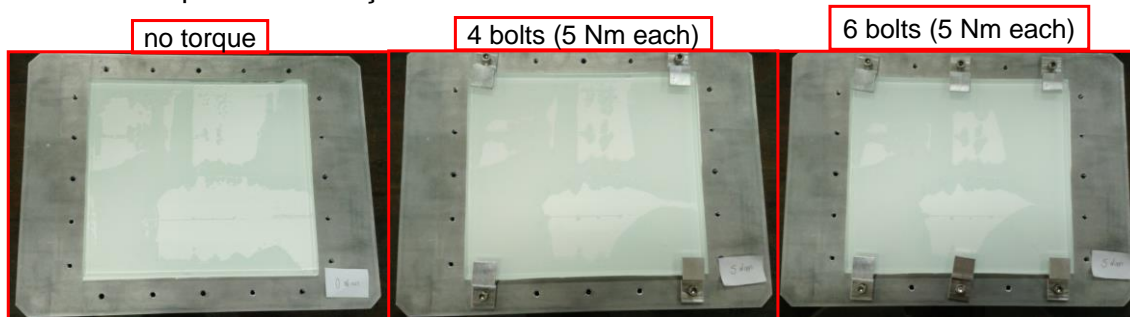


## 4.2 Dispositivo Transparente – Graxa Térmica

A graxa térmica *Dow Corning 340 HS compound* foi aplicada conforme o procedimento descrito no item 3.2.3, controlando a espessura de aplicação com linha de náilon de 0,2 mm do lado da chapa de alumínio. Com o auxílio de uma alça com ventosa, o vidro foi posicionado sobre a graxa aplicada.

A Figura 4.4 mostra o vidro posicionado sobre a graxa sem aplicar torque, com torque nominal em 4 pontos e torque nominal em seis pontos.

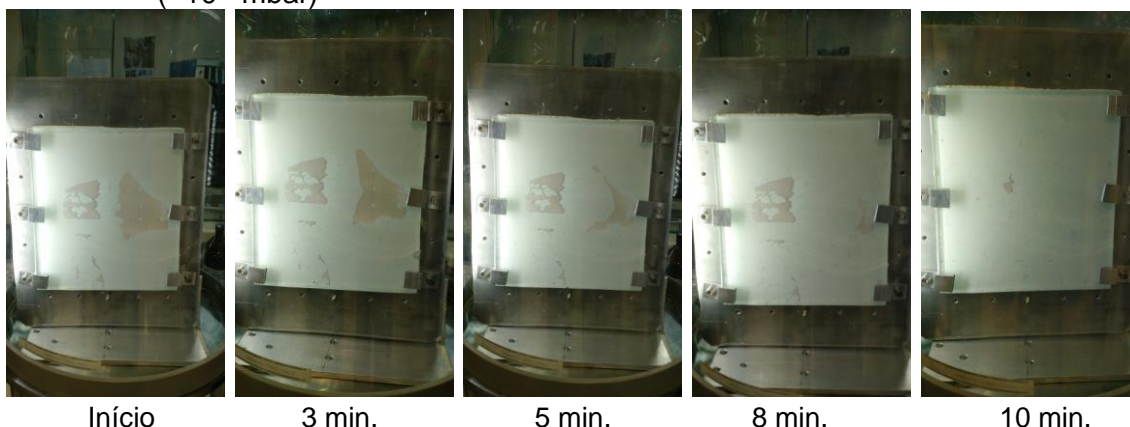
Figura 4.4 – Graxa térmica aplicada com vidro posicionado sem torque e com torque em 4 e 6 pontos de fixação



As manchas mais claras correspondem à área sem contato. Nota-se que as manchas diminuem um pouco com a fixação e torque no perímetro do vidro, mas não desaparecem totalmente. Isso indica que mesmo com vários pontos de fixação ao longo do perímetro, o problema de falta de contato no centro (bolhas de ar) não foi solucionado para o espécime testado.

Para avaliar o comportamento da graxa térmica aplicada no vácuo, o conjunto montado na configuração com 6 pontos de fixação foi submetido a baixa pressão (até  $\sim 10^{-3}$  mbar) por aproximadamente 10 minutos dentro de uma câmara de vidro acoplada a uma bomba de vácuo mecânica *Edwards 5 E2M5 Rotary Vane Dual Stage Mechanical Vacuum Pump*. A evolução das bolhas de ar pode ser observada na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Evolução das bolhas de ar na interface com graxa térmica sob baixa pressão ( $\sim 10^{-3}$  mbar)



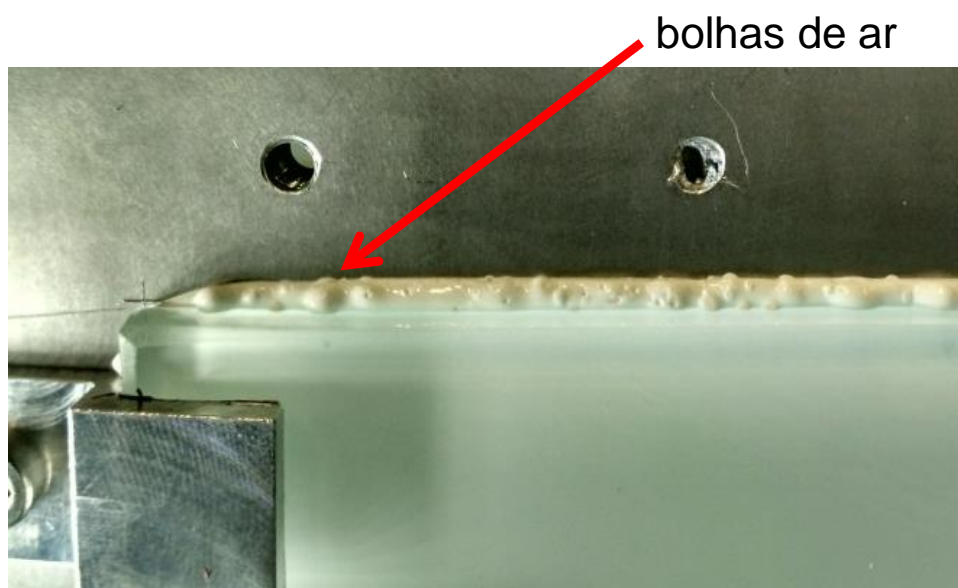
É possível notar que em pouco tempo de exposição à baixa pressão, as bolhas se moveram e diminuíram de tamanho, sendo que ao final do processo as bolhas haviam praticamente sumido, Figura 4.6.

Figura 4.6 – Graxa térmica em pressão ambiente: antes e depois do vácuo



A Figura 4.7 revela que durante a exposição do conjunto a baixa pressão, bolhas de ar foram expelidas nas bordas do vidro, diminuindo a falta de contato ao longo da interface.

Figura 4.7 – Bolhas de ar sendo expelidas nas bordas do vidro



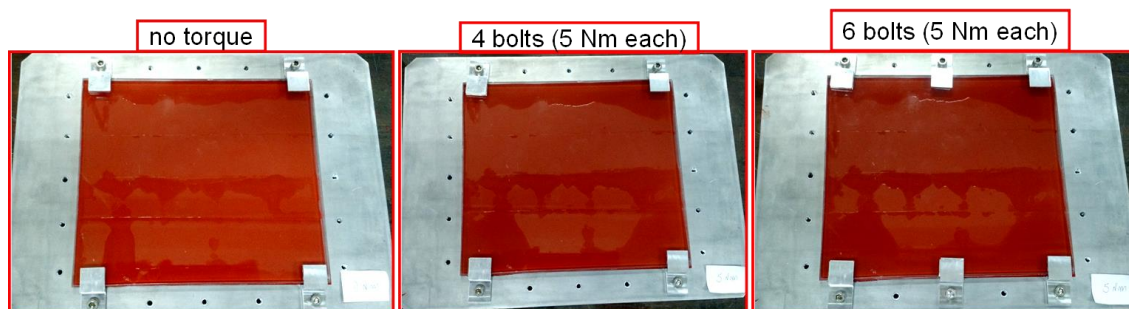
Nota-se claramente que quando submetida à baixa pressão, a interface montada com graxa térmica tem o contato ao longo da superfície melhorado. Porém, adiciona o risco de contaminação de outras partes do satélite pelo excesso de graxa expelida nas bordas do vidro.

### 4.3 Dispositivo Transparente – RTV566

O *RTV566 Momentive* foi aplicado da mesma forma da graxa térmica, com espessura controlada de 0,2 mm e foi deixado curar já com torque de 5 N.m em 6 pontos de fixação.

A Figura 4.8 mostra o vidro posicionado sobre o RTV566 e após aplicar torque, com torque nominal em 4 pontos e torque nominal em 6 pontos.

Figura 4.8 – RTV566 aplicado com vidro sem torque e com torque em 4 e 6 pontos de fixação

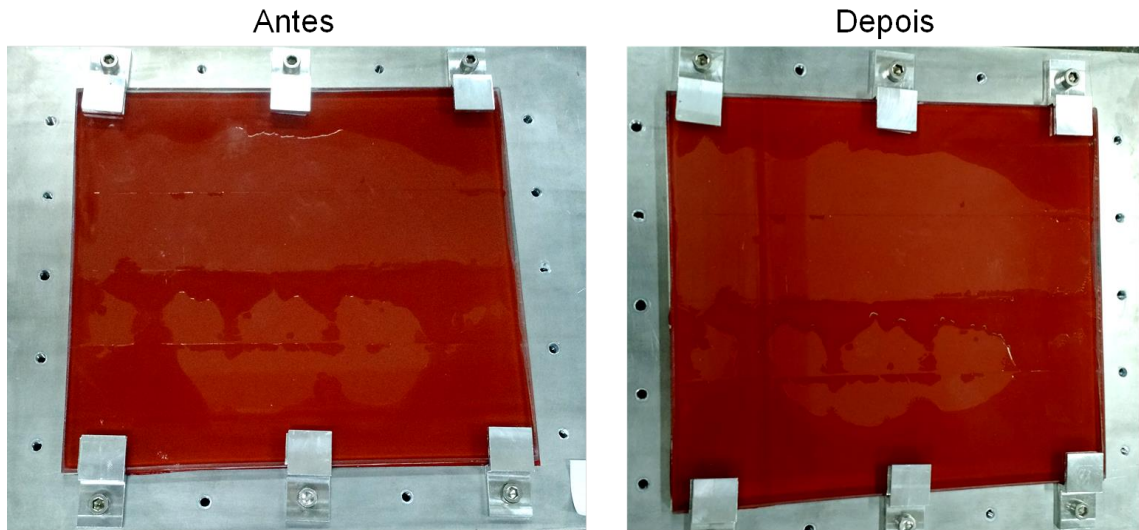


Assim como no caso da graxa, as manchas mais claras correspondem à área sem contato. Nota-se que as manchas diminuem muito pouco com a fixação e torque no perímetro do vidro, permanecendo com grandes áreas sem contato. Isso mostra que mesmo com vários pontos de fixação ao longo do perímetro, o problema de falta de contato no centro (bolhas de ar) não foi solucionado para o espécime do estudo.

Este conjunto também foi submetido à baixa pressão ( $\sim 10^{-3}$  mbar) dentro da câmara de vácuo. Porém, a mudança é praticamente imperceptível, como pode ser observado na Figura 4.9.



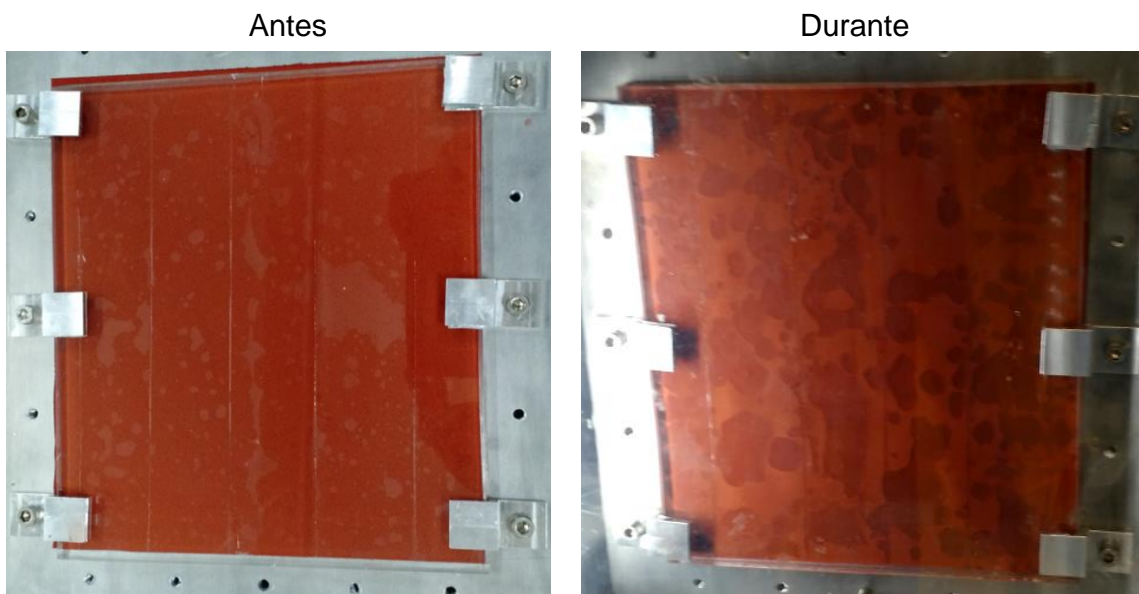
Figura 4.9 – RTV566 em pressão ambiente: antes e depois do vácuo



Diferentemente da graxa, o RTV566 sofreu um processo de cura, tornando o material inteiriço e não mais fluido. Essa pode ser a razão pela qual as bolhas de ar não são expulsas durante a exposição a baixas pressões.

Foi realizado um teste com uma manta de RTV566 de 0,2 mm curada fora da interface com o vidro e instalada posteriormente. A Figura 4.10 mostra a manta pré-curada já com o vidro instalado e 6 pontos de fixação com torque de 5 N.m cada.

Figura 4.10 – manta pré-curada de RTV566 com bolhas de ar, antes e quando submetida a vácuo ( $\sim 10^{-3}$  mbar)



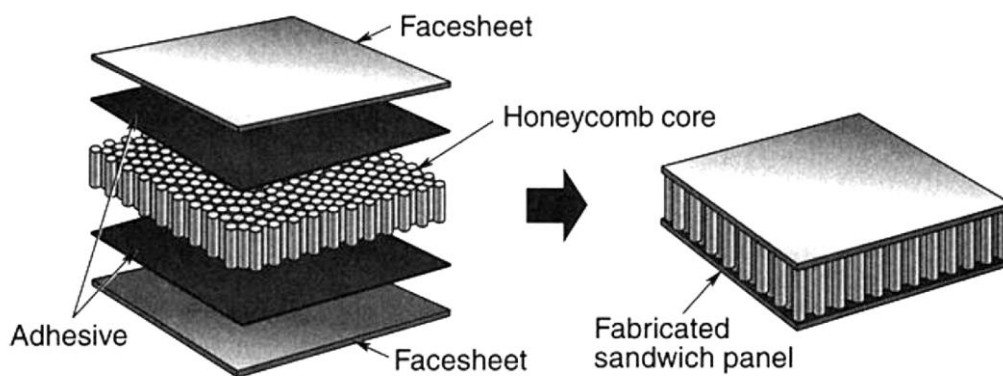
Este conjunto também foi submetido à baixa pressão ( $\sim 10^{-3}$  mbar) na câmpnula e foi observado um fenômeno bastante inesperado. As bolhas de ar presas na interface expandem aproximadamente 5 vezes em área sob baixa pressão, não sendo eliminadas e voltando à área original quando se retorna a pressão atmosférica. Isso indica que quando utilizadas em vácuo a área sem contato é bem maior do que a observada durante a instalação em pressão atmosférica. Isto indica o RTV566, para a espessura utilizada, seja aplicado no estado fluido, com cura posterior de montagem do equipamento com torque aplicado nos parafusos, uma vez que a área efetiva de contato através do RTV566 ficou instável e foi drasticamente reduzida em vácuo.

## 5 DESCRIÇÃO DO APARATO E CONFIGURAÇÃO DE TESTE

### 5.1 Aparato de Teste

Foi desenvolvido um aparato de teste específico e original que representa a interface de um equipamento com estrutura de alumínio montado e parafusado em um painel sanduíche com estrutura *honeycomb* e *facesheets* de alumínio, como mostrado na Figura 5.1. Esta configuração é tipicamente usada em satélites, em especial os desenvolvidos pelo INPE.

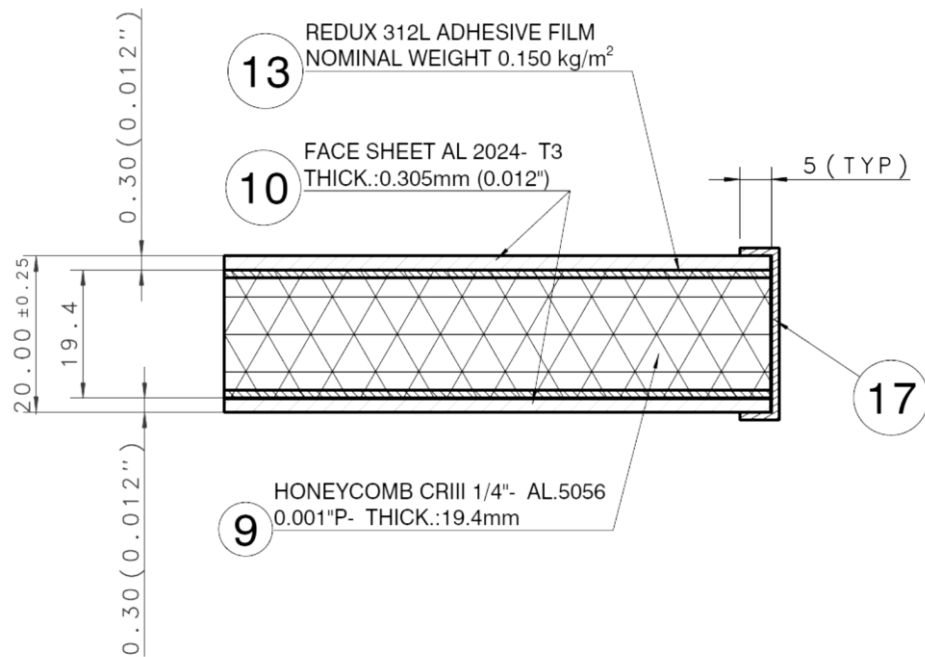
Figura 5.1 – Esquema da estrutura painel sanduíche de *honeycomb*



Fonte: Gilmore (2002)

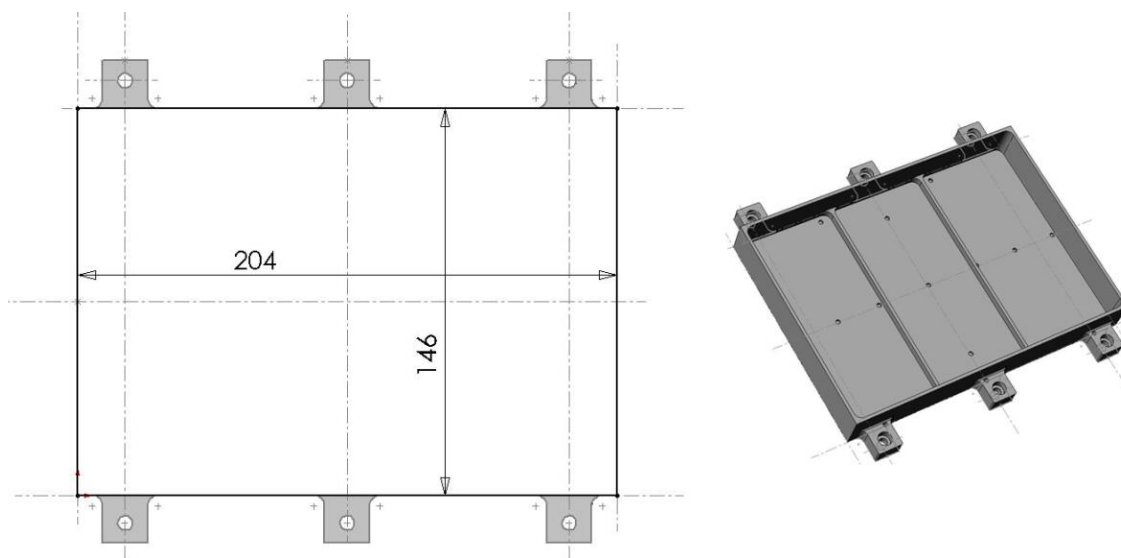
Para o experimento, foram utilizados fragmentos com dimensões 305 x 230 mm do painel de voo do *CBERS 3&4 PM04 Sun Panel* (core: *honeycomb CR111*,  $H = 0.0194$  m,  $S = 0.006350$  m,  $\delta = 0.0000254$  m, *Al 5056* / *facesheets*: *Al 2024-T3*). A Figura 5.2 mostra detalhes de projeto do painel utilizado.

Figura 5.2 – Detalhes construtivos do painel utilizado.



Para se chegar à solução que melhor representasse um equipamento eletrônico típico usado nos satélites do INPE, especialmente do ponto de vista de rigidez da base, foi realizado um estudo considerando 12 equipamentos reais, o qual resultou na configuração do *dummy* mostrada na Figura 5.3. Este *dummy* possui dimensões, pontos de fixação e e nervuras para rigidez tipicamente encontrados nos equipamentos. As principais dimensões são 204 x 146 x 25 mm e espessura da base de 2 mm.

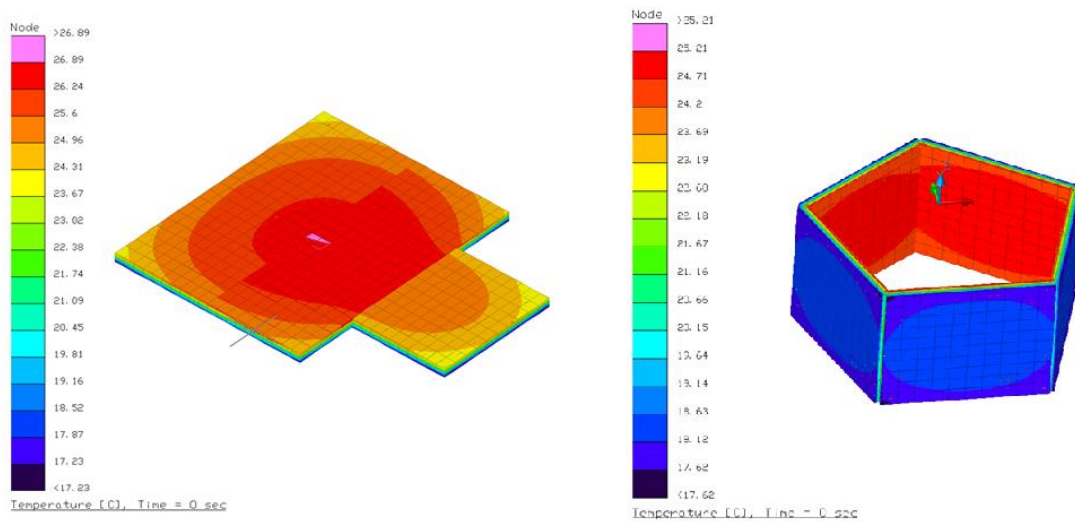
Figura 5.3 - Desenho do *dummy* de equipamento eletrônico



Durante o desenvolvimento do conceito, algumas configurações foram analisadas e testadas através de TMMs desenvolvidos no programa Thermal Desktop SINDA/Fluint. A Figura 5.4 mostra a simulação de cinco amostras com 2 configurações diferentes dentro da Câmara Vácuo-Térmica de 1x1 m do LIT. Na primeira, os 5 conjuntos de amostras são dispostas lado a lado no mesmo plano, sem acoplamento condutivo entre si, com mesma carga térmica individual e trocas de calor por radiação com a camisa fria da CVT. Nota-se que para esta configuração, devido à diferença no acoplamento por radiação das amostras centrais, as mesmas ficam mais quentes, em condições térmicas desiguais.

Na segunda, as mesmas 5 amostras estão dispostas formando um pentágono, sem acoplamento condutivo entre si, com a mesma carga térmica individual e com trocas de calor por radiação com a camisa fria da CVT. Nota-se claramente que esta configuração apresenta condições térmicas muito mais homogêneas e equivalentes em comparação com a configuração em que as amostras estão dispostas no mesmo plano, o que facilita muito a comparação entre as diferentes amostras e foi a escolhida para este trabalho.

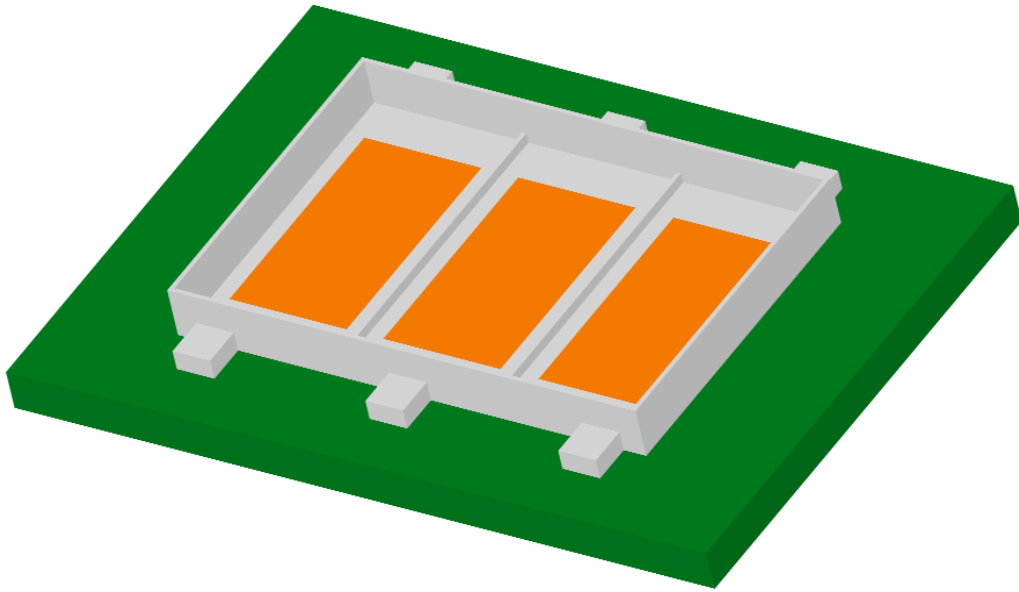
Figura 5.4. Simulação de duas configurações de posicionamento das amostras



Outra vantagem da configuração em pentágono é que reduz perdas de calor por radiação dos elementos que simulam a dissipação de calor do equipamento, uma vez que, além de estar isolado com MLI, não tem fator de forma para o *shroud* frio da CVT. Isso faz com que todo o fluxo de calor dissipado fique direcionado ao radiador, assim atravessando a interface de contato a ser estudada.

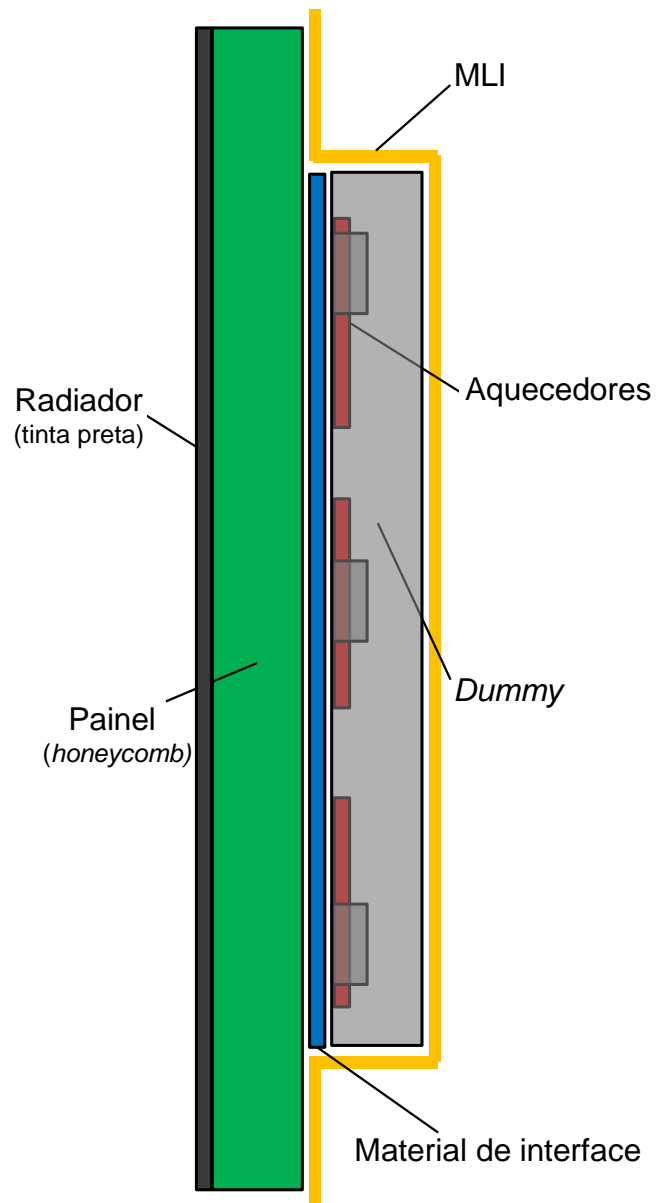
Assim, o experimento é composto por cinco pares de *dummies* e painéis estruturais de *honeycomb*. Cada *dummy* é fixado sobre seu painel correspondente através de seis parafusos M5 com torque de 5 N.m, o mesmo utilizado nos satélites do INPE, de acordo com o DCS do CBERS 04A. A Figura 5.5 ilustra um dos pares.

Figura 5.5 – Conjunto *dummy*-painel



Cada um dos pares é composto por um painel com estrutura de *honeycomb* com um dos lados pintados com tinta preta (emissividade  $\epsilon_{IR}$  alta, atuando como radiador), um *dummy* que representa a base de um equipamento eletrônico com 3 aquecedores de superfície (*skin-heaters*) para simular a dissipação dos componentes e manta super-isolante multicamadas (MLI) para isolar termicamente (radiação) o conjunto. A Figura 5.6 mostra o esquema da montagem do conjunto.

Figura 5.6 – Esquema de montagem do conjunto *dummy*-painel



Com o objetivo de conhecer as imperfeições do plano das superfícies que entrariam em contato na interface, foi realizado o mapeamento da planicidade das superfícies tanto dos painéis como dos *dummies*. Este mapeamento foi utilizado para fazer a escolha do conjunto *painel-dummy*. Todas as combinações dos 5 *dummies* e 5 painéis foram avaliadas. A escolha dos pares foi baseada no critério da menor diferença na distância média dos pontos coincidentes devido às irregularidades superficiais das amostras. Assim, os pares foram usados da seguinte forma: D1-P1, D2-P2, D3-P5, D4-P3 e D5-P4. O estudo completo é apresentado no APÊNDICE C.

A Figura 5.7 mostra a fotografia de um dos conjuntos montado e pronto para a instalação na estrutura.

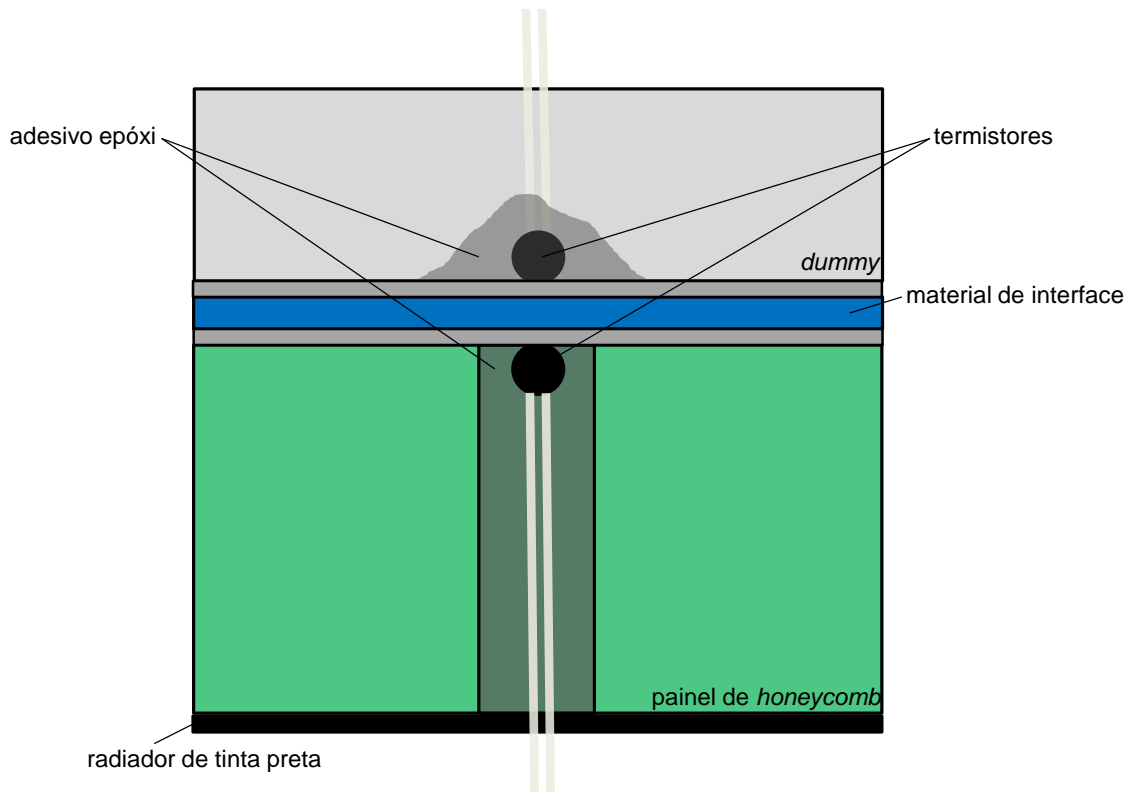


Figura 5.7 – Fotografia de um dos conjuntos já montado com MLI



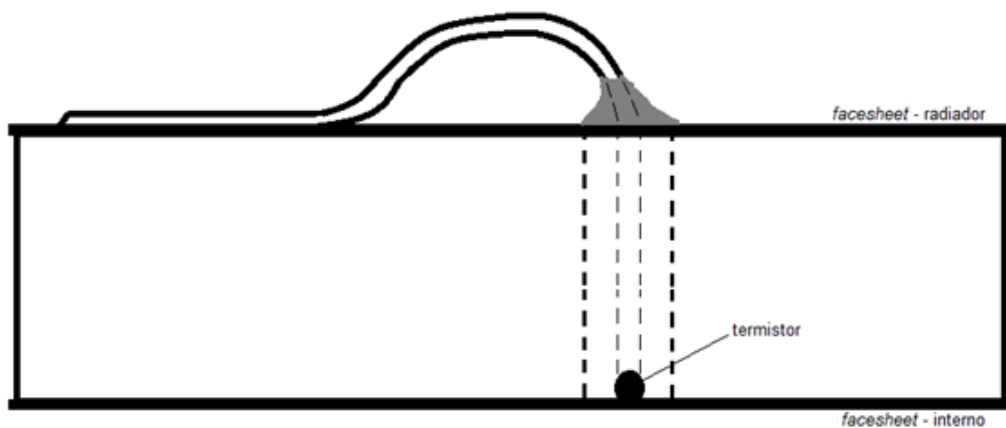
Cada conjunto possui 24 sensores de temperatura embutidos, 12 no painel e 12 no *dummy* e estão posicionados aos pares em coordenadas correspondentes, ambos com a mesma distância até a interface ( $\sim 0,3$  mm), conforme ilustrado na Figura 5.8, facilitando assim o tratamento dos dados para identificar a resistência térmica de contato no local. Todos os sensores são termistores do fabricante *Nanjing Shiheng Electronics Co.*, modelo *MD52 pearl-shape NTC R10 K $\Omega$  @ 25 °C*.

Figura 5.8 – Esquema da localização dos sensores de temperatura – termistores



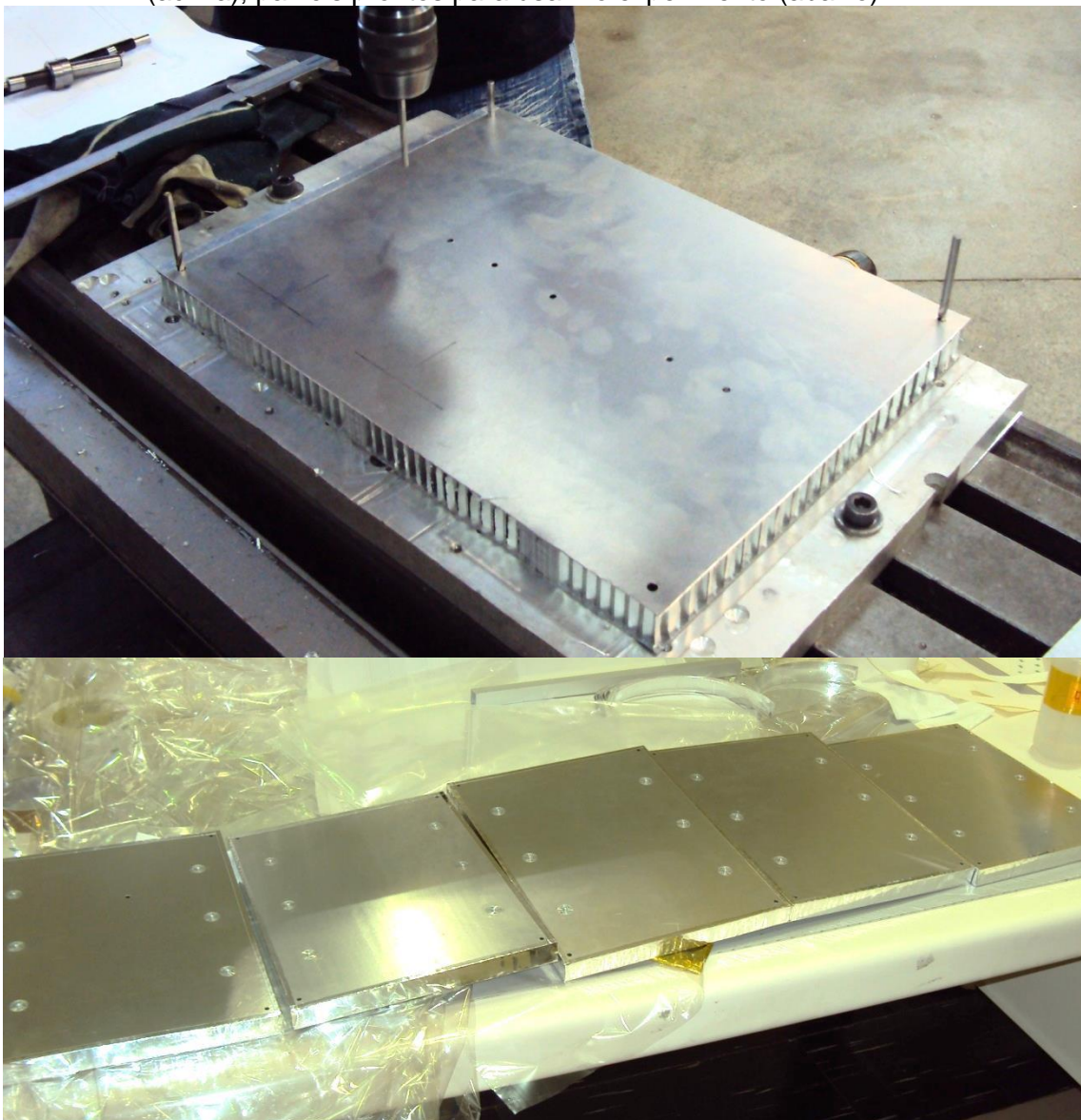
Um estudo foi realizado a fim de identificar a influência do esfriamento indesejado do sensor de temperatura instalado no *facesheet* do painel através da fiação, por atuar como uma aleta radiativa. Como resultado deste estudo, a recomendação foi acoplar condutivamente o fio do sensor com o *facesheet* do radiador no menor comprimento possível exposto a troca de calor com o *shroud* da CVT, Figura 5.9. Mais detalhes são apresentados no Apêndice B.

Figura 5.9 – Detalhe de acoplamento do fio do sensor no painel



A Figura 5.10 mostra os painéis durante o processo de preparação para utilizar no aparato de teste. Os mesmos foram cortados e usinados para receber incertos e sensores de temperatura e pintados na face do radiador. A tinta utilizada é a *MAP PU1 Low outgassing black polyurethane paint*, modelo, com emissividade no espectro infravermelho de  $\epsilon_{N,IR} = 0,88 \pm 0,04$ . Todos os termistores tiveram as suas curvas individuais levantadas e suas temperaturas corrigidas, os detalhes são apresentados no Apêndice B.

Figura 5.10 – Painel sendo retrabalhado para receber insertos e sensores de temperatura (acima); painéis prontos para usar no experimento (abaixo).



Os sensores de temperatura foram distribuídos ao longo da interface de forma a aproveitar a simetria geométrica e reduzir o número de sensores, mesmo que não

necessariamente exista uma simetria no acoplamento térmico da interface. Além disso, 8 termopares do tipo T *Omega AWG26* adicionais foram instalados para prover mais informações da distribuição das temperaturas. A localização dos termistores, assim como dos termopares adicionais nos 5 conjuntos *dummy*-painel, é mostrada em Figura 5.11 a Figura 5.15. A descrição e detalhamento dos termopares usados são mostrados no Apêndice A.

Figura 5.11 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D1/P1

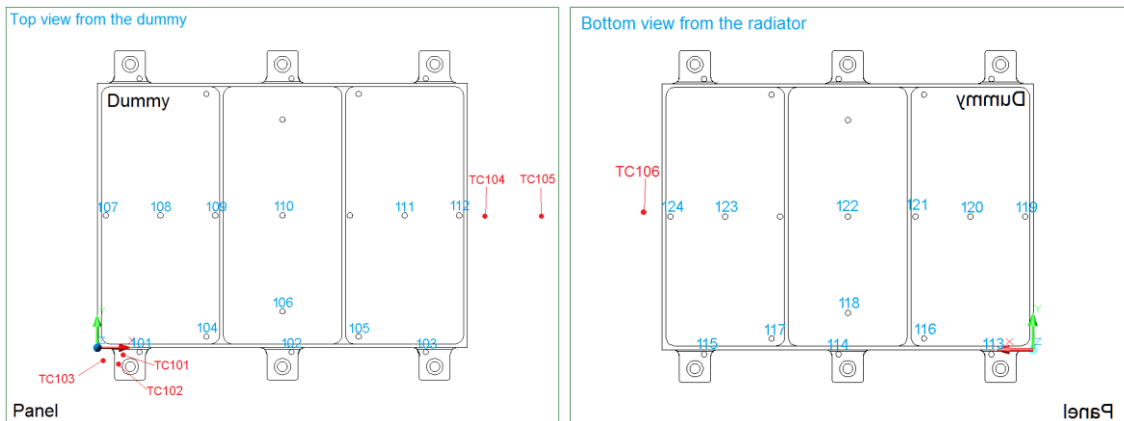


Figura 5.12 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D2/P2

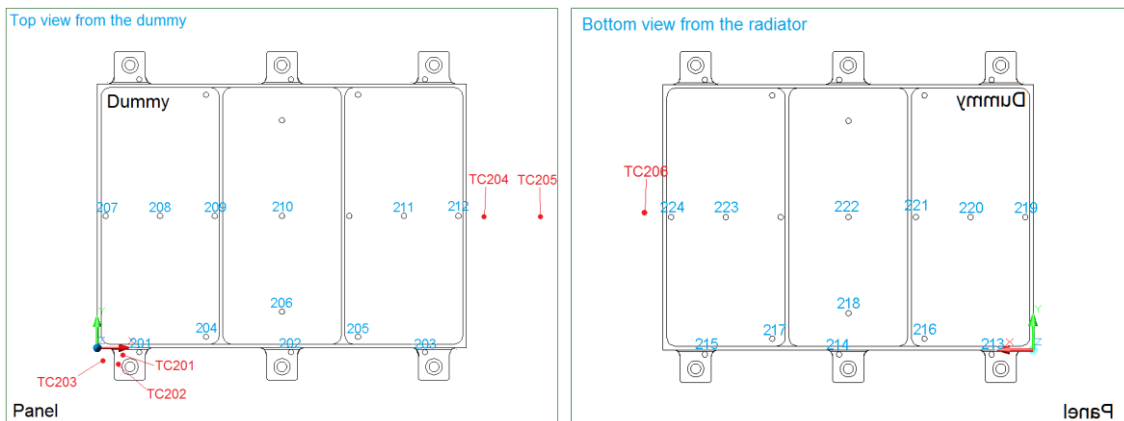


Figura 5.13 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D3/P5

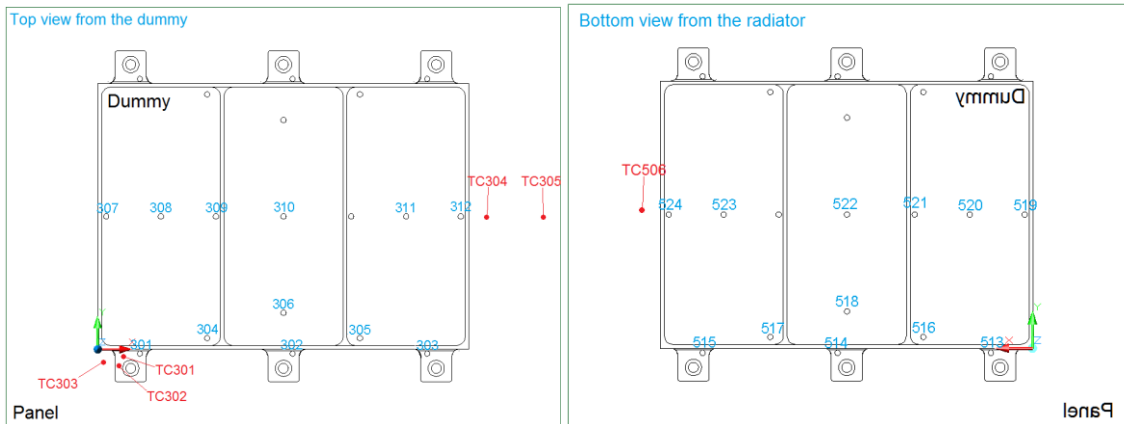


Figura 5.14 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D4/P3

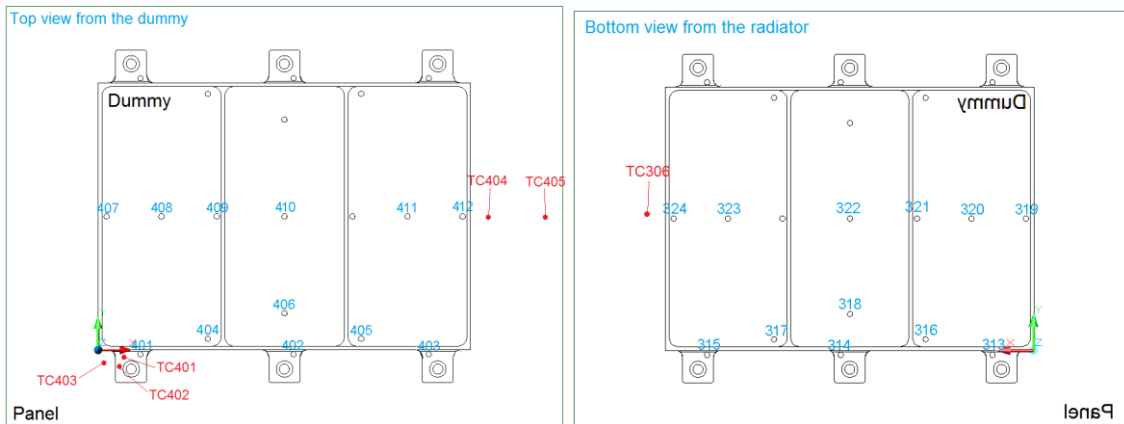
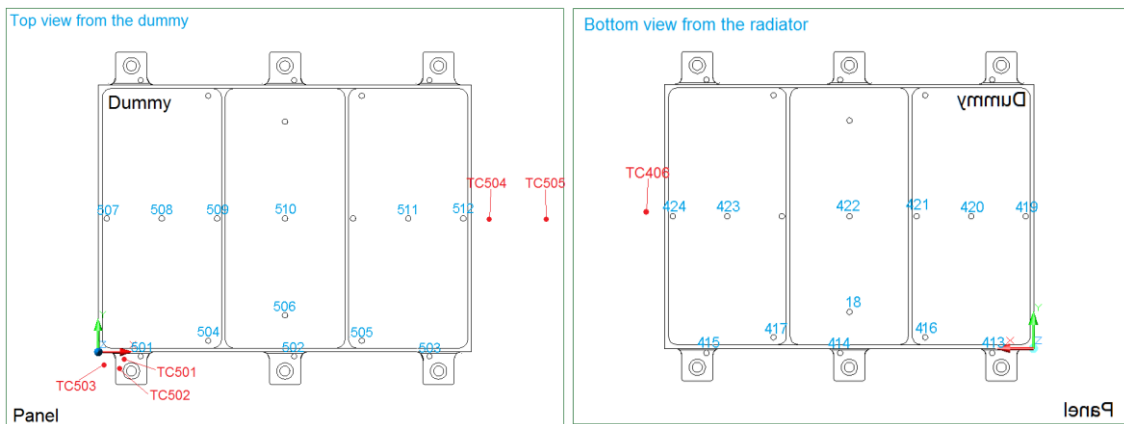


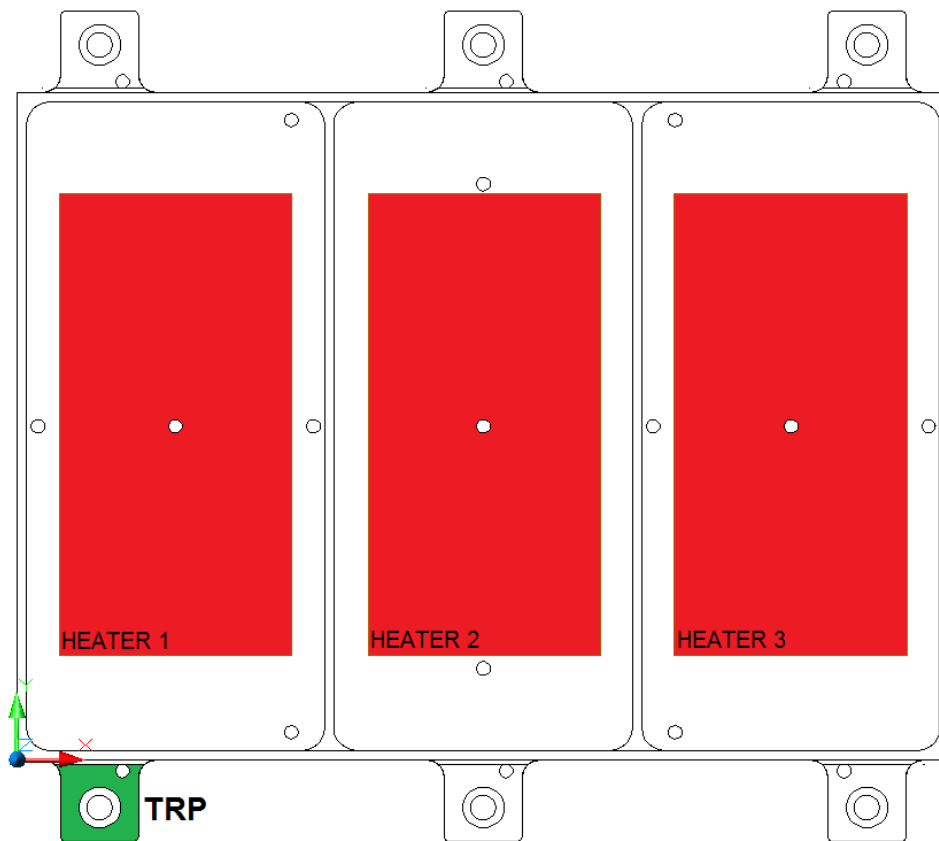
Figura 5.15 - Localização dos termistores e termopares do conjunto D5/P4



O *dummy* é capaz de simular a dissipação de calor que ocorre em um equipamento real. Isto é realizado com o uso de aquecedores planos e flexíveis do tipo *MINCO*<sup>®</sup> *HK5422R4.8L12E Kapton*<sup>®</sup> *Foil Heater* com resistência elétrica nominal de 4.8 Ω e fios de bitola 24 AWG.

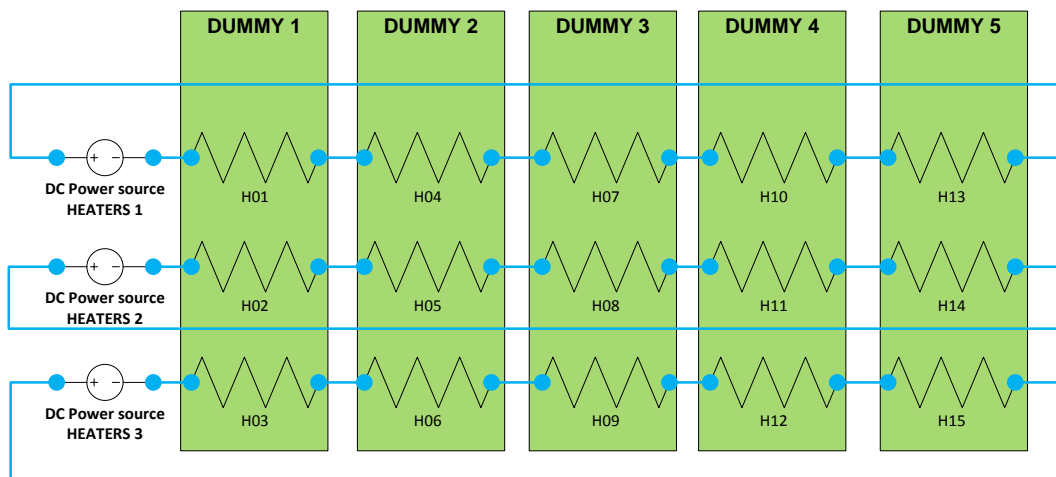
Outra vantagem do experimento é a possibilidade de reproduzir a dissipação de calor não homogênea ao longo da base do *dummy*, o que é bastante comum em equipamentos com diferentes modos de funcionamento ou redundância interna. A Figura 5.16 ilustra os aquecedores independentes que cada *dummy* possui. Assim, é possível ser aquecido em três regiões diferentes e independentes, simulando a dissipação de calor de forma homogênea ou não homogênea do equipamento eletrônico.

Figura 5.16 – Distribuição dos aquecedores na base do *dummy*



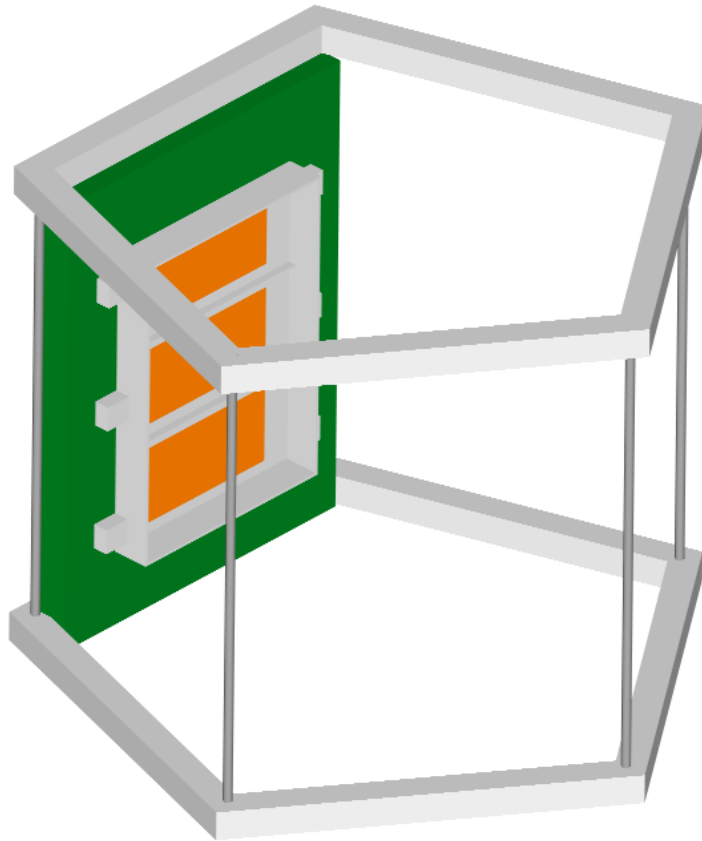
Para controlar a dissipação não homogênea dos diferentes pares, os *heaters* foram ligados em três circuitos, de acordo com a Figura 5.17, o que permite que todos ou somente uma das regiões seja ligada. São usadas apenas três fontes de alimentação (*DC power supply units*).

Figura 5.17 – Circuitos elétricos dos heaters



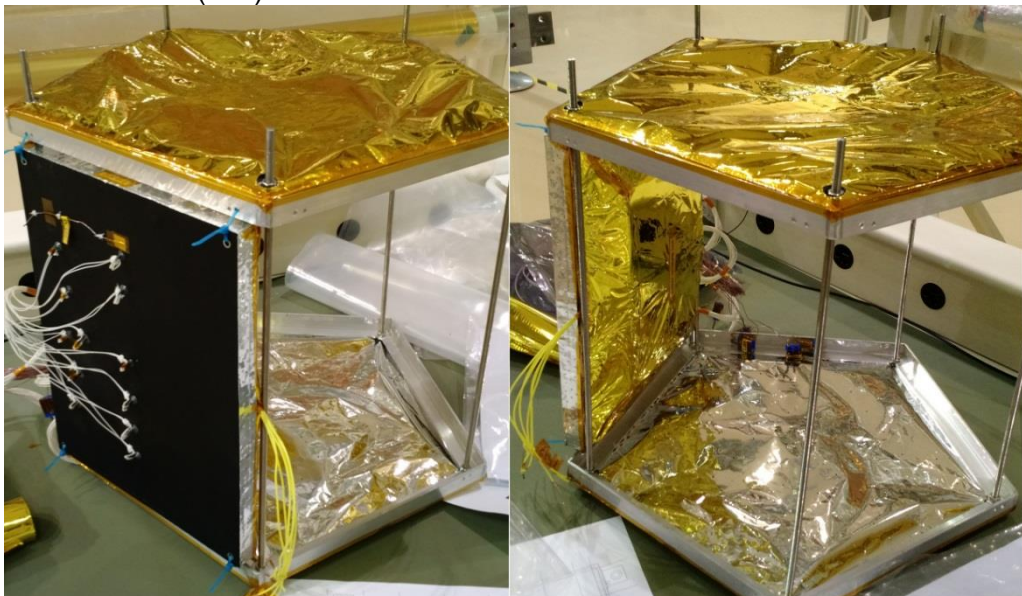
Para posicionar os pares de forma a manter as condições de contorno homogêneas, todos os conjuntos são montados através de abraçadeiras isolantes de náilon *Panduit PAN-TY® PLT1M-M76 Aqua Blue Tefzel*, nas duas estruturas construídas com perfis de alumínio em formato de pentágono, os quais são espaçados por cinco barras roscadas de aço inox. Isso garante que as amostras fiquem na mesma configuração simulada anteriormente. Uma imagem esquemática da estrutura com um dos conjuntos instalado é mostrada na Figura 5.18.

Figura 5.18 – Montagem do experimento (somente um conjunto montado)



A Figura 5.19 mostra uma fotografia da estrutura com um dos conjuntos montados, vista do exterior (radiador) e do interior (MLI sobre o *dummy*).

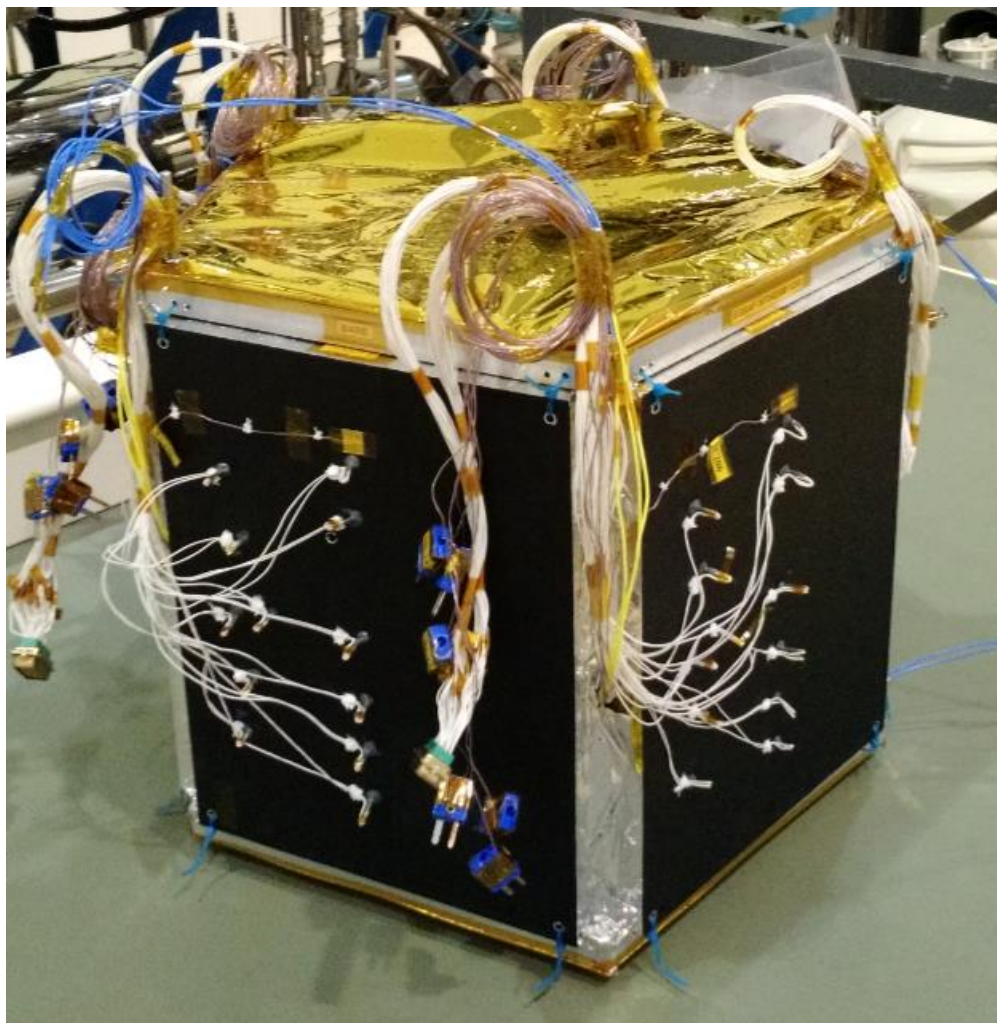
Figura 5.19 – Fotografia de um conjunto montado na estrutura, vista externa (radiador) e interna (MLI)





Após a montagem dos cinco conjuntos na estrutura, mantas superisolantes multicamadas (MLI) são instaladas nas faces pentagonais superior e inferior do aparato conforme mostrado na Figura 5.20, para minimizar as perdas de calor que não sejam através das interfaces estudadas. Todas as mantas MLI utilizadas são compostas por 15 camadas de Mylar<sup>®</sup> aluminizado nas duas faces com camada externa de Kapton<sup>®</sup> aluminizado apenas em uma face.

Figura 5.20 – Montagem final do experimento

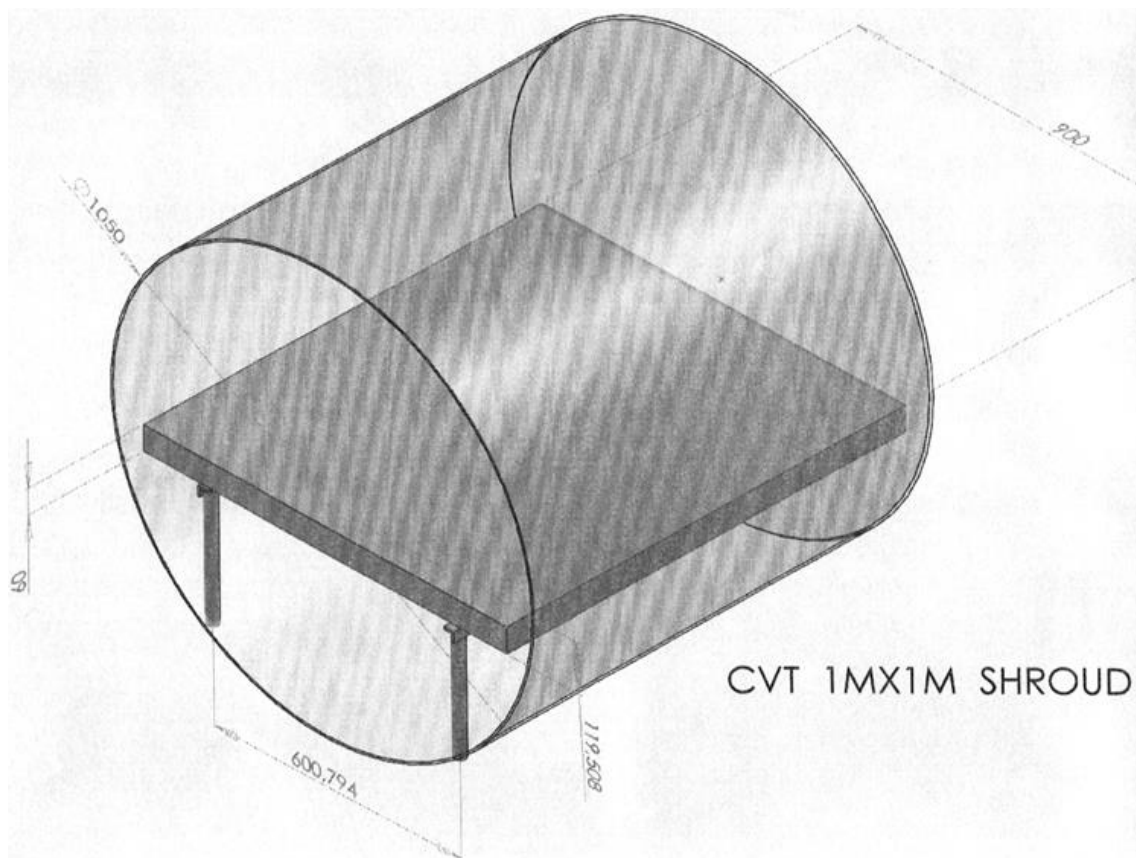


Este aparato permite o teste simultâneo de diferentes interfaces, com ou sem material de preenchimento, submetidas a condições mecânicas e térmicas equivalentes, com o objetivo de minimizar incertezas e facilitar o tratamento dos dados e comparação dos resultados.

## 5.2 Configuração de Teste

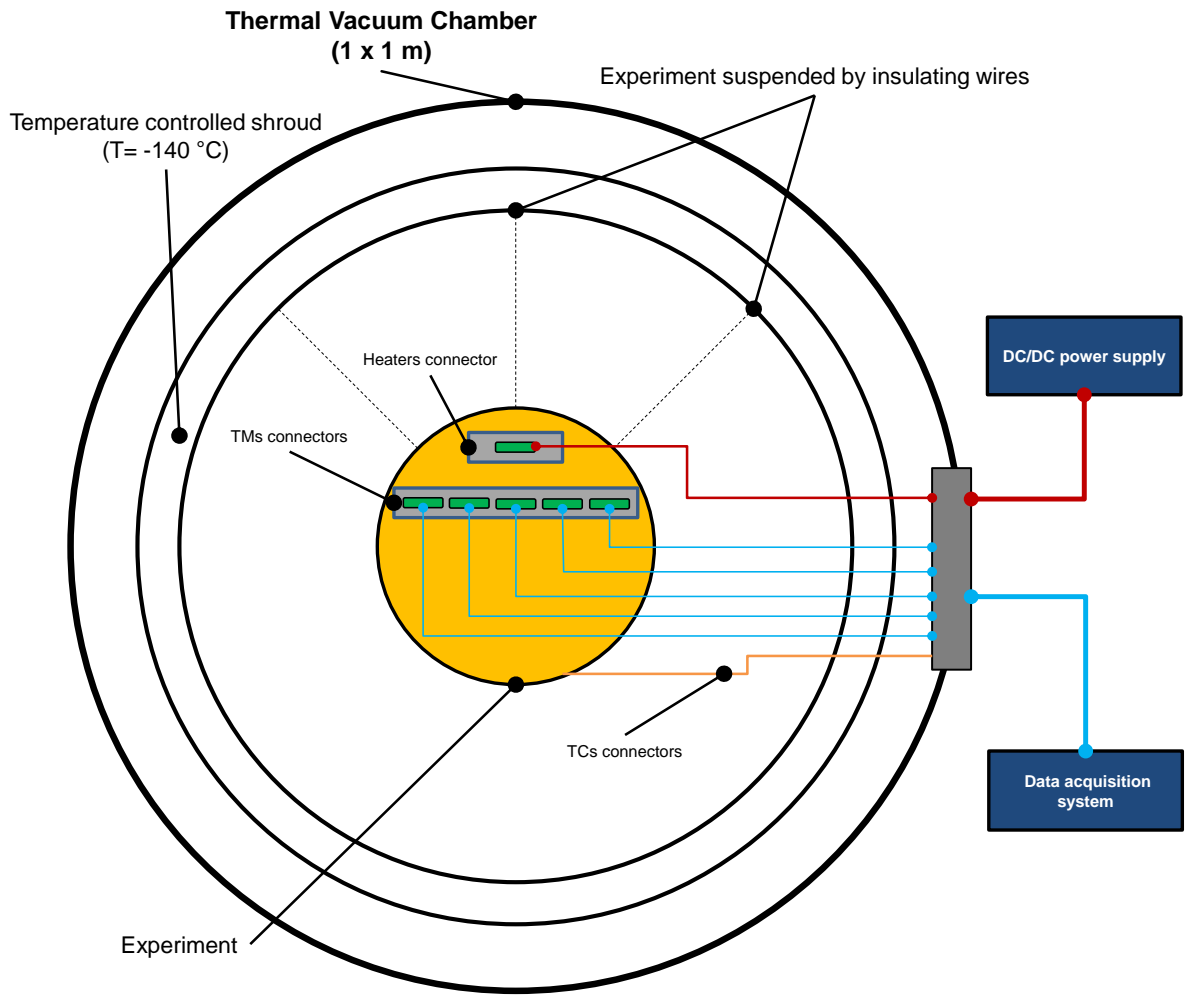
O aparato foi concebido para ser testado na Câmara Vácuo-Térmica de 1x1 m do LIT. A Figura 5.21 mostra um desenho esquemático com as dimensões internas da CVT. No teste, a base que aparece no desenho não é utilizada, pois o aparato fica suspenso dentro da CVT.

Figura 5.21 – Dimensões internas da Câmara Vácuo-Térmica de 1x1 m



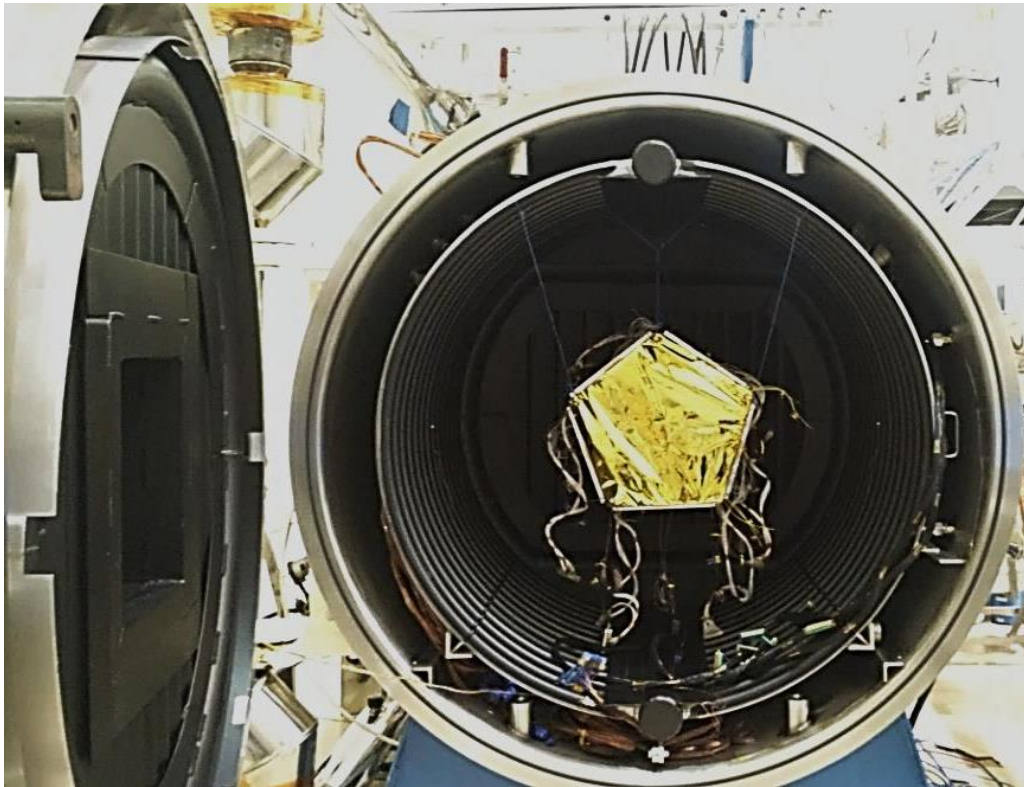
A Figura 5.22 apresenta a ilustração esquemática da configuração do teste, mostrando as interfaces mecânicas e elétricas do experimento com a câmara de vácuo. O aparato é posicionado de forma suspensa no centro da CTV através de fios isolantes.

Figura 5.22 – Esquema da configuração de teste



A Figura 5.23 mostra o experimento já instalado dentro da CTV do LIT, antes de fechar a porta para início do teste.

Figura 5.23 – Aparato pendurado dentro da CVT 1x1 m do LIT



Pela especificação elaborada para o teste, a CVT deverá manter a temperatura do seu *shroud* em  $-140\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ , ou mais frio durante todo o teste. Ao final do teste, a temperatura do *shroud* deverá ser levada a um patamar de aproximadamente  $+20\text{ °C}$ , antes de voltar à temperatura e pressão ambientes. Ainda, a camisa da câmara deve ter emissividade ( $\epsilon_{IR}$ ) de no mínimo 0,9. A pressão dentro da câmara deve ser mantida menor que  $1 \times 10^{-4}$  mbar durante todo o teste. O espécime deve ser posicionado no centro da CVT, pendurado através de cabos isolantes com o objetivo de ter homogeneidade na troca de calor entre o *shroud* frio da CVT e os radiadores.

Os TRPs (*Temperature Reference Points*), localizados em um dos pés do dummy, devem atingir patamares de temperaturas dentro dos níveis de qualificação típicos de equipamentos eletrônicos, ou seja, de  $-20\text{ °C}$  a  $+45\text{ °C}$ . Estas temperaturas são monitoradas por termopares do tipo T conectados ao sistema de aquisição de dados e também são gravadas.

## 6 PLANEJAMENTO DOS TESTES

Dois testes foram planejados, com intervalo de seis meses entre eles. Em ambos, deve ser realizada a caracterização de todas as interfaces em 6 níveis de potência nos aquecedores para realizar medidas em diferentes níveis de temperatura. O objetivo é caracterizar o desempenho térmico dos diferentes materiais instalados nas interfaces em função da temperatura, em níveis compreendidos entre os limites de qualificação tipicamente estabelecidos para equipamentos eletrônicos embarcados nos satélites, de -20 à +45 °C. Porém, foram planejados patamares fora destes limites, de -40 à +70 °C apenas para observar o comportamento das interfaces.

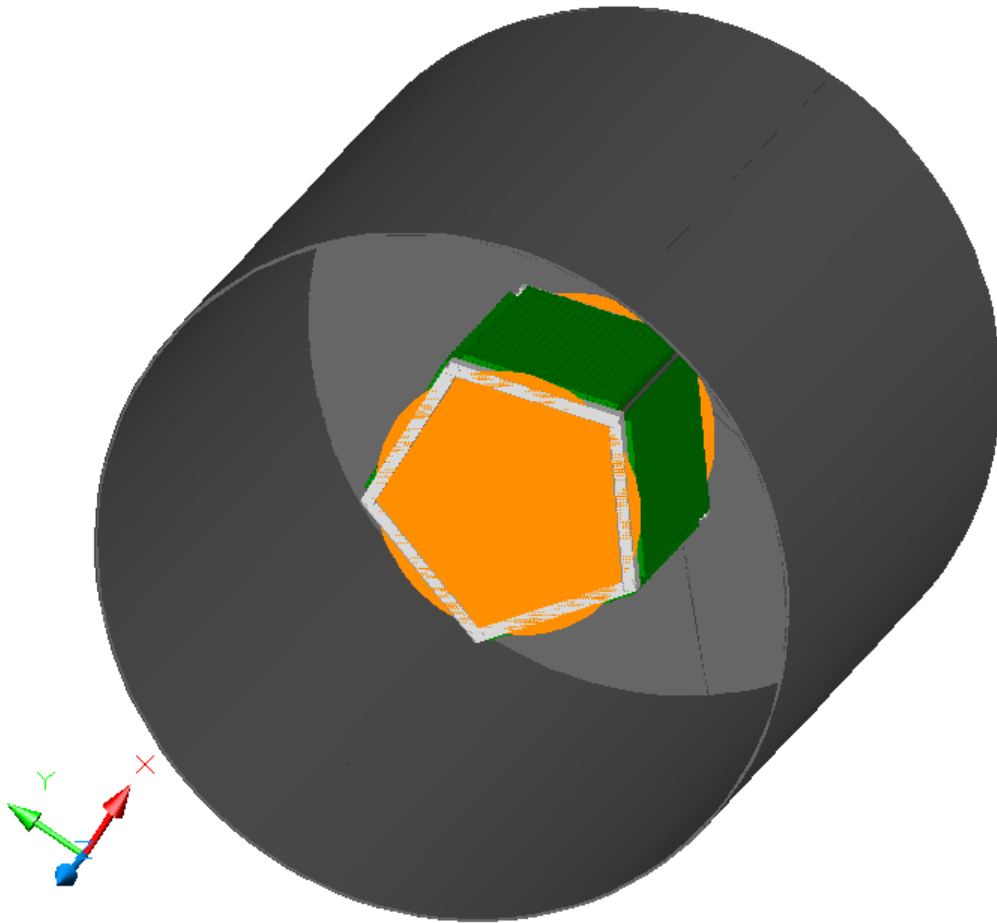
Tal caracterização deve ser realizada com os patamares de potência impostos de maneira crescente e decrescente, com variação da homogeneidade de dissipação de calor ao longo da área do *dummy* do equipamento.

Ainda, uma ciclagem térmica foi planejada entre dois ciclos de caracterização. Após seis meses de armazenamento o espécime deve ser submetido a uma nova caracterização do desempenho térmico.

### 6.1 TMM Simplificado do Conjunto de Teste

Um Modelo Térmico Matemático (TMM) simplificado foi desenvolvido, utilizando o programa *Thermal Desktop® SINDA/FLUINT 4.8*, o qual foi usado para estimar a potência necessária nos aquecedores para atingir cada patamar de temperatura a ser executado no teste. Além disso, o TMM serviu também para prever a duração dos testes. A Figura 6.1 mostra representação da geometria do TMM posicionado no centro da Câmara Vácuo-Térmica 1x1 m do LIT.

Figura 6.1 – TMM do aparato dentro do *shroud* da CVT



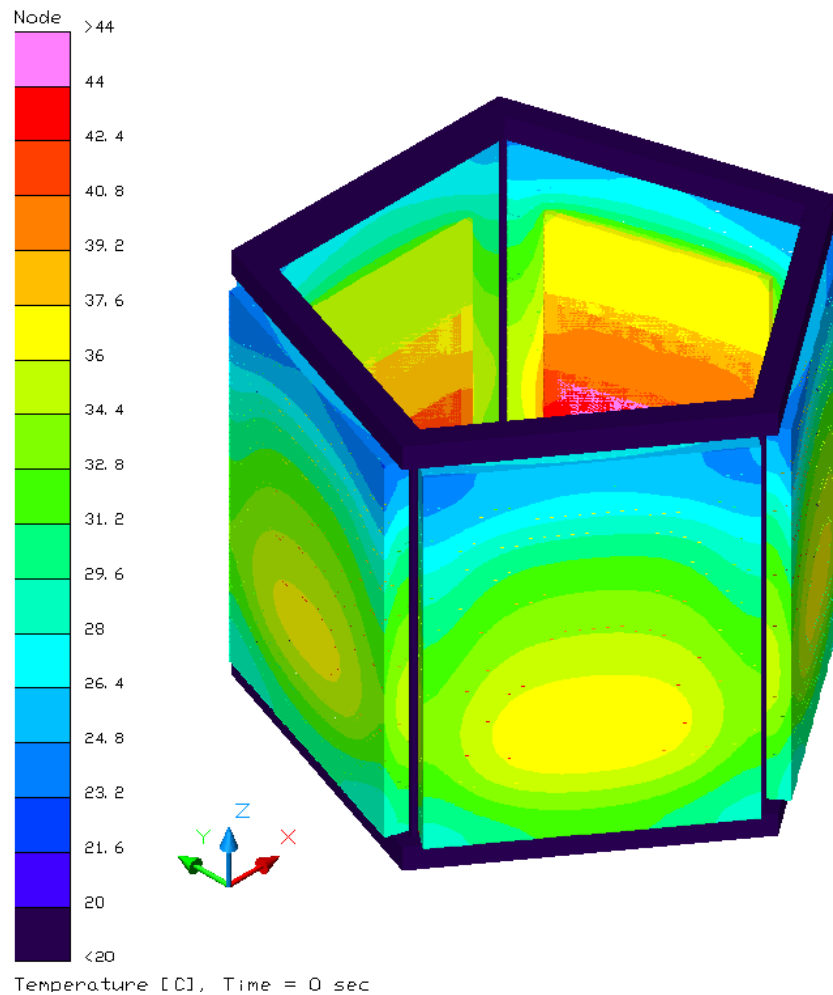
O TMM foi construído com 13780 nós no total, composto de 2200 para os *dummies*, construídos com elementos do tipo *bricks* com propriedade de condutividade térmica de alumínio acoplados condutivamente aos painéis e carga térmica aplicada em 15 nós dos aquecedores do tipo superfície acopladas condutivamente aos *dummies*, 15 nós para a estrutura, sem acoplamento com os painéis, 11200 nós para os painéis sanduíche de *honeycomb* construídos com elementos do tipo *brick* e propriedades térmicas equivalentes, acoplados condutivamente aos *dummies* e 350 nós para o *shroud* da CVT.

Todos os elementos geométricos do TMM foram colocados em um grupo de troca de calor por radiação no interior da CVT e propriedades óticas típicas de cada uma das superfícies.

A Figura 6.2 apresenta um mapa de temperaturas gerado pelo TMM para um dos casos a serem testados. Nota-se que a distribuição dos conjuntos na estrutura em

forma de pentágono deixa todas as amostras em condições térmicas equivalentes, conforme previsto anteriormente.

Figura 6.2 – TMM simplificado do experimento – mapa de temperaturas



O TMM foi usado para determinar níveis de potência que correspondem os níveis da temperatura desejáveis e para determinar a duração de teste.

## 6.2 Aplicação de Potência

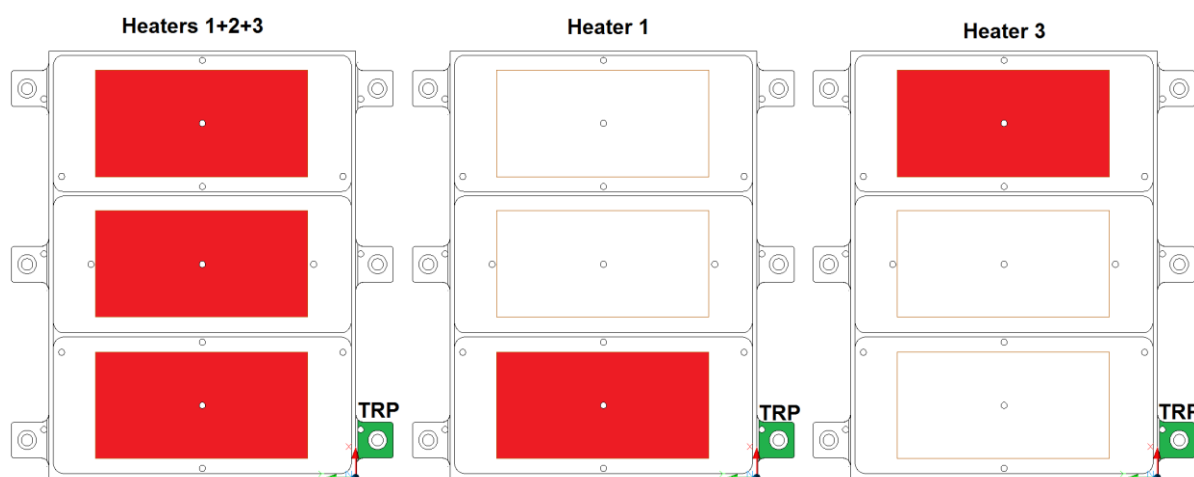
Durante o teste, os *dummies* devem ser colocados em três diferentes modos de operação, conforme descrito na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Descrição dos modos de operação dos *dummies*.

Modo de operação	Descrição
H1+H2+H3	Os 3 <i>heaters</i> do dummy são ligados
H1	Apenas o <i>heater</i> H1 (próximo ao <i>TRP</i> ) é ligado
H3	Apenas o <i>heater</i> H3 é ligado

A Figura 6.3 ilustra estes três modos de operação definidos para os *dummies* e que devem ser aplicados ao longo das diferentes fases do teste para simular a dissipação não-homogênea ao longo da base do equipamento.

Figura 6.3 – Modos de operação dos *dummies*



Os aquecedores dos *dummies* são controlados através de três fontes de alimentação DC independentes, uma para cada posição, a fim de reproduzir este fenômeno. A corrente e tensão dos canais de alimentação das fontes são monitoradas e gravadas.

Para facilitar a execução dos testes e a comparação entre as amostras, todos os conjuntos devem receber a mesma potência aplicada nos seus respectivos aquecedores. Isso é possível pela natureza da montagem dos circuitos elétricos, nos quais os aquecedores dos diferentes conjuntos são controlados simultaneamente pelas mesmas fontes de alimentação.



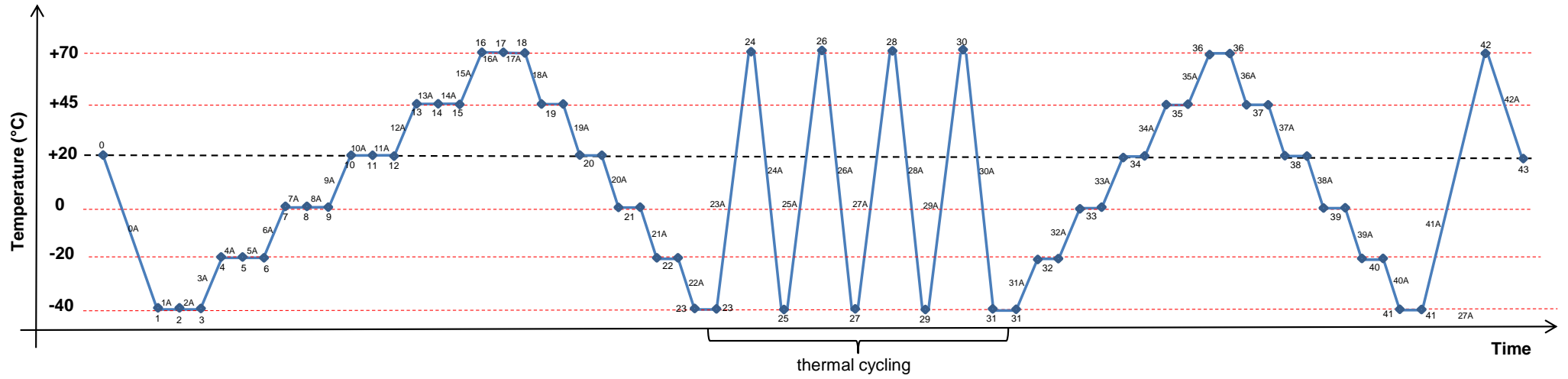
### 6.3 Sequência de Teste – Teste1, com Ciclagem Térmica

No Teste 1, deve ser feita a caracterização das interfaces nos diferentes níveis de temperatura, com os patamares impostos de forma crescente e decrescente, assim como ciclagem térmica e repetição da caracterização.

De forma resumida, o espécime é submetido, sob vácuo, a seis níveis de temperaturas dentro dos limites de qualificação (de -20 °C a + 45 °C) e mais dois patamares adicionais extremos. Em um primeiro momento, cada nível de temperatura deverá ser atingido nos três modos de operação previstos para os *dummies* (H1+H2+H3, H1 e H3), partindo do nível mais baixo (-40 °C) para o nível mais alto (+70 °C). Em um segundo momento, os mesmos níveis de temperatura devem ser repetidos na sequência inversa, ou seja, do nível mais alto para o nível mais baixo no modo de operação H1+H2+H3 seguido do modo H1. Na sequência, quatro ciclos entre as temperaturas de -40 e + 70 °C devem ser executados. Por fim, o espécime deverá repetir a caracterização realizada no início do teste e ser levado à temperatura e pressão ambientes, antes da abertura da câmara. A

Figura 6.4 mostra um gráfico do plano de teste com as diferentes fases previstas para o teste.

Figura 6.4 – Fases do Teste 1



A Tabela 6.2 mostra de forma detalhada a descrição de cada fase do Teste 1, da fase 0 até a fase 43, incluindo fases de transição entre patamares. O critério de convergência adotado foi variação menor que 0,02 °C/min nos sensores de controle com a observação das tendências das curvas de todos os sensores do espécime.

Tabela 6.2 – Descrição das fases do Teste 1

ETAPA	DESCRIÇÃO	ESTIMATIVA DE TEMPO (horas)
Fase 0	Início do teste	0,0
Fase 0A	Transiente para o primeiro patamar de -40 °C com H1+H2+H3	3,0
Fase 1	Patamar de -40 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 1A	Transiente para o patamar de -40 °C com H1	2,0
Fase 2	Patamar de -40 °C com H1	0,0
Fase 2A	Transiente para o patamar de -40 °C com H3	2,0
Fase 3	Patamar de -40 °C com H3	0,0
Fase 3A	Transiente para o patamar de -20 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 4	Patamar de -20 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 4A	Transiente para o patamar de -20 °C com H1	2,0
Fase 5	Patamar de -20 °C com H1	0,0
Fase 5A	Transiente para o patamar de -20 °C com H3	2,0
Fase 6	Patamar de -20 °C com H3	0,0
Fase 6A	Transiente para o patamar de 0 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 7	Patamar de 0 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 7A	Transiente para o patamar de 0 °C com H1	2,0
Fase 8	Patamar de 0 °C com H1	0,0
Fase 8A	Transiente para o patamar de 0 °C com H3	2,0
Fase 9	Patamar de 0 °C com H3	0,0
Fase 9A	Transiente para o patamar de +20 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 10	Patamar de +20 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 10A	Transiente para o patamar de +20 °C com H1	2,0
Fase 11	Patamar de +20 °C com H1	0,0
Fase 11A	Transiente para o patamar de +20 °C com H3	2,0
Fase 12	Patamar de +20 °C com H3	0,0
Fase 12A	Transiente para o patamar de +45 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 13	Patamar de +45 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 13A	Transiente para o patamar de +45 °C com H1	2,0
Fase 14	Patamar de +45 °C com H1	0,0
Fase 14A	Transiente para o patamar de +45 °C com H3	2,0
Fase 15	Patamar de +45 °C com H3	0,0
Fase 15A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 16	Patamar de +70 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 16A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1	2,0
Fase 17	Patamar de +70 °C com H1	0,0
Fase 17A	Transiente para o patamar de +70 °C com H3	2,0
Fase 18	Patamar de +70 °C com H3	0,0
Fase 18A	Transiente para o patamar de +45 °C com H1+H2+H3	1,5

continua

Tabela 6.2 - Conclusão

Fase 19	Patamar de +45 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 19A	Transiente para o patamar de +20 °C com H1+H2+H3	1,5
Fase 20	Patamar de +20 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 20A	Transiente para o patamar de 0 °C com H1+H2+H3	1,5
Fase 21	Patamar de 0 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 21A	Transiente para o patamar de -20 °C com H1+H2+H3	1,5
Fase 22	Patamar de -20 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 22A	Transiente para o patamar de -40 °C com H1+H2+H3	1,5
Fase 23	Patamar de -40 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 23A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	1,0
Fase 24	Patamar de +70 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	0,0
Fase 24A	Transiente para o patamar de -40 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	1,5
Fase 25	Patamar de -40 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	0,0
Fase 25A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	1,0
Fase 26	Patamar de +70 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	0,0
Fase 26A	Transiente para o patamar de -40 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	1,5
Fase 27	Patamar de -40 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	0,0
Fase 27A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	1,0
Fase 28	Patamar de +70 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	0,0
Fase 28A	Transiente para o patamar de -40 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	1,5
Fase 29	Patamar de -40 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	0,0
Fase 29A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	1,0
Fase 30	Patamar de +70 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	0,0
Fase 30A	Transiente para o patamar de -40 °C com H1+H2+H3 (ciclos)	1,5
Fase 31	Patamar de -40 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 31A	Transiente para o patamar de -20 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 32	Patamar de -20 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 32A	Transiente para o patamar de 0 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 33	Patamar de 0 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 33A	Transiente para o patamar de +20 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 34	Patamar de +20 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 34A	Transiente para o patamar de +45 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 35	Patamar de +45 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 35A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1+H2+H3	1,0
Fase 36	Patamar de +70 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 36A	Transiente para o patamar de +45 °C com H1+H2+H3	1,5
Fase 37	Patamar de +45 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 37A	Transiente para o patamar de +20 °C com H1+H2+H3	1,5
Fase 38	Patamar de +20 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 38A	Transiente para o patamar de 0 °C com H1+H2+H3	1,5
Fase 39	Patamar de 0 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 39A	Transiente para o patamar de -20 °C com H1+H2+H3	1,5
Fase 40	Patamar de -20 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 40A	Transiente para o patamar de -40 °C com H1+H2+H3	1,5
Fase 41	Patamar de -40 °C com H1+H2+H3	0,0
Fase 41A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1+H2+H3 e shroud mais quente (~-20 °C)	2,0
Fase 42	Patamar de +70 °C com H1+H2+H3 e shroud mais quente (~-20 °C)	0,0
Fase 42A	Transiente para temperatura ambiente	1,0
Fase 43	Fim do teste	0,0
<b>TEMPO TOTAL</b>		<b>65,0</b>

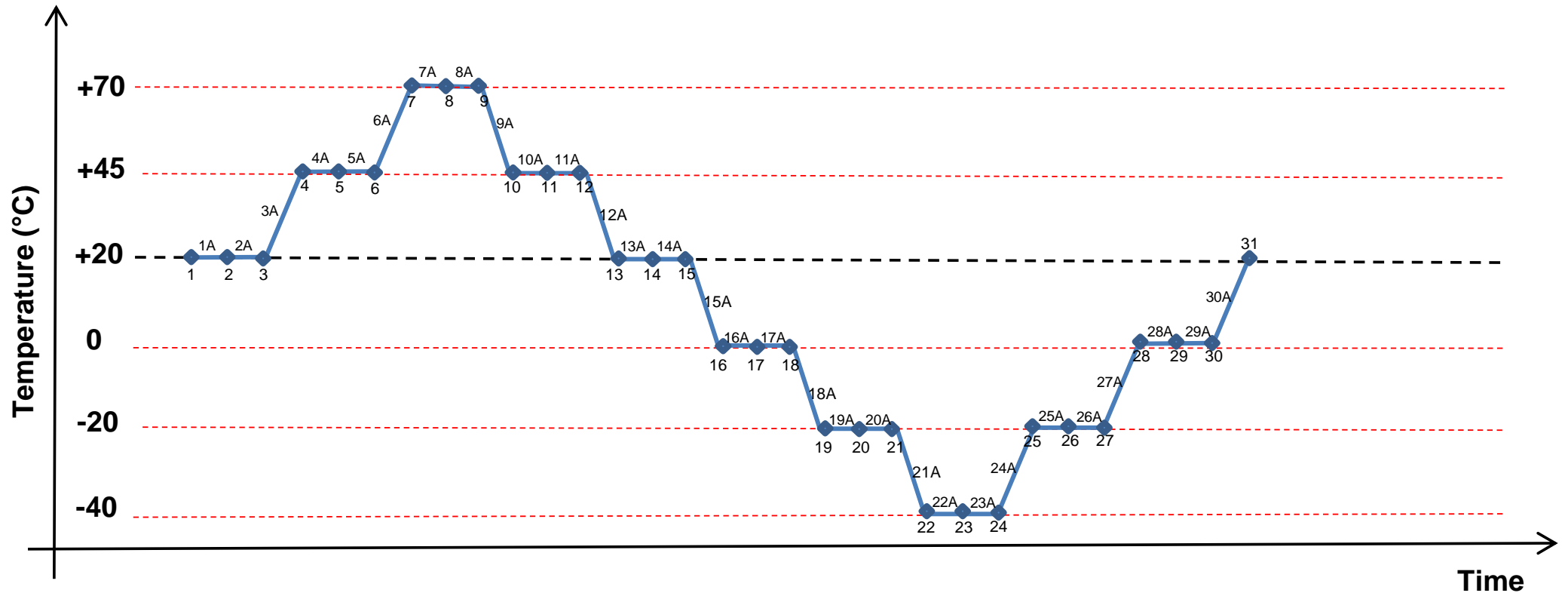
#### 6.4 Sequência de Teste – Teste2, 6 Meses de Armazenamento

No Teste 2, que é executado após de seis meses de armazenamento de conjuntos com material de interface aplicado, deve ser realizada apenas a caracterização do desempenho térmico das interfaces nos diferentes níveis de temperatura, com os patamares impostos de forma crescente e decrescente.

Basicamente, o espécime é submetido, sob vácuo, a seis níveis de temperaturas, de -40 °C a + 70 °C. Cada nível de temperatura deverá ser atingido nos três modos de operação previstos para os *dummies* (H1+H2+H3, H1 e H3), partindo do nível +20 °C, o qual é próximo da temperatura ambiente, subindo até o nível de +70 °C. Após atingir o nível máximo, os patamares são impostos de forma decrescente até atingir o limite mínimo de -40 °C. Em seguida, se impõe os níveis de temperatura de forma crescente até retornar ao patamar inicial de +20 °C. Por fim, o espécime que já deve estar à temperatura ambiente, é levado à pressão ambiente antes de abrir a câmara. A Figura 6.5 mostra um gráfico com as diferentes fases previstas para o Teste 2.

O critério de convergência adotado foi variação menor que 0,02 °C/min para os sensores de controle somada a observação das tendências das curvas de todos os sensores do espécime, assim como para o Teste 1. Os valores de temperatura em regime permanente serão refinados a partir de dados experimentais e a metodologia desenvolvida, Subcapítulo 8.1.

Figura 6.5 – Fases do Teste 2



A Tabela 6.3 mostra de forma detalhada a descrição de cada fase do Teste 2, da fase 1 até a fase 31, incluindo fases de transição entre patamares.

Tabela 6.3 – Descrição das fases do Teste 2

ETAPA	DESCRIÇÃO	ESTIMATIVA DE TEMPO (horas)
Fase 1	Patamar de +20 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 1A	Transiente para o patamar de +20 °C com H1	1.5
Fase 2	Patamar de +20 °C com H1	0.0
Fase 2A	Transiente para o patamar de +20 °C com H3	1.5
Fase 3	Patamar de +20 °C com H3	0.0
Fase 3A	Transiente para o patamar de +45 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 4	Patamar de +45 °C com H1+H2+H3	0.0
Fase 4A	Transiente para o patamar de +45 °C com H1	1.5
Fase 5	Patamar de +45 °C com H1	0.0
Fase 5A	Transiente para o patamar de +45 °C com H3	1.5
Fase 6	Patamar de +45 °C com H3	0.0
Fase 6A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 7	Patamar de +70 °C com H1+H2+H3	0.0
Fase 7A	Transiente para o patamar de +70 °C com H1	1.5
Fase 8	Patamar de +70 °C com H1	0.0
Fase 8A	Transiente para o patamar de +70 °C com H3	1.5
Fase 9	Patamar de +70 °C com H3	0.0
Fase 9A	Transiente para o patamar de +45 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 10	Patamar de +45 °C com H1+H2+H3	0.0
Fase 10A	Transiente para o patamar de +45 °C com H1	1.5
Fase 11	Patamar de +45 °C com H1	0.0
Fase 11A	Transiente para o patamar de +45 °C com H3	1.5
Fase 12	Patamar de +45 °C com H3	0.0
Fase 12A	Transiente para o patamar de +20 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 13	Patamar de +20 °C com H1+H2+H3	0.0
Fase 13A	Transiente para o patamar de +20 °C com H1	1.5
Fase 14	Patamar de +20 °C com H1	0.0
Fase 14A	Transiente para o patamar de +20 °C com H3	1.5
Fase 15	Patamar de +20 °C com H3	0.0
Fase 15A	Transiente para o patamar de 0 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 16	Patamar de 0 °C com H1+H2+H3	0.0
Fase 16A	Transiente para o patamar de 0 °C com H1	1.5
Fase 17	Patamar de 0 °C com H1	0.0
Fase 17A	Transiente para o patamar de 0 °C com H3	1.5
Fase 18	Patamar de 0 °C com H3	0.0
Fase 18A	Transiente para o patamar de -20 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 19	Patamar de -20 °C com H1+H2+H3	0.0
Fase 19A	Transiente para o patamar de -20 °C com H1	1.5

continua

Tabela 6.3 - Conclusão

Fase 20	Patamar de -20 °C com H1	0.0
Fase 20A	Transiente para o patamar de -20 °C com H3	1.5
Fase 21	Patamar de -20 °C com H3	0.0
Fase 21A	Transiente para o patamar de -40 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 22	Patamar de -40 °C com H1+H2+H3	0.0
Fase 22A	Transiente para o patamar de -40 °C com H1	1.5
Fase 23	Patamar de -40 °C com H1	0.0
Fase 23A	Transiente para o patamar de -40 °C com H3	1.5
Fase 24	Patamar de -40 °C com H3	0.0
Fase 24A	Transiente para o patamar de -20 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 25	Patamar de -20 °C com H1+H2+H3	0.0
Fase 25A	Transiente para o patamar de -20 °C com H1	1.5
Fase 26	Patamar de -20 °C com H1	0.0
Fase 26A	Transiente para o patamar de -20 °C com H3	1.5
Fase 27	Patamar de -20 °C com H3	0.0
Fase 27A	Transiente para o patamar de 0 °C com H1+H2+H3	1.0
Fase 28	Patamar de 0 °C com H1+H2+H3	0.0
Fase 28A	Transiente para o patamar de 0 °C com H1	1.5
Fase 29	Patamar de 0 °C com H1	0.0
Fase 29A	Transiente para o patamar de 0 °C com H3	1.5
Fase 30	Patamar de 0 °C com H3	0.0
Fase 30A	Transiente para temperatura ambiente	0.0
Fase 31	Fim do teste	0.0
<b>TEMPO TOTAL</b>		<b>40</b>



## 7 REALIZAÇÃO DOS TESTES

### 7.1 Abordagem para a Execução dos Testes

No total, foram executados dois testes, totalizando cerca de 121 horas, de acordo com o mostrado na Tabela 7.1.

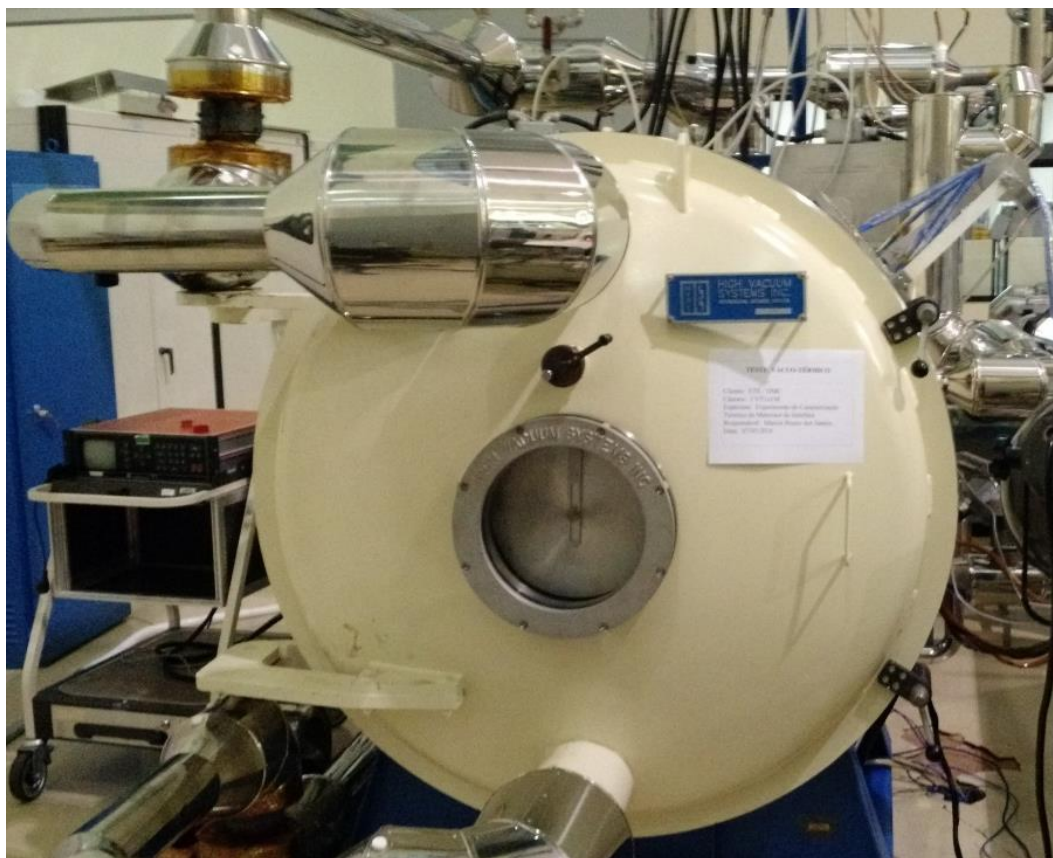
Tabela 7.1 – Duração dos testes executados

	<b>Início</b>	<b>Término</b>	<b>Duração</b>
<b>Teste 1</b>	07/03/2016, 14:08	10/03/2016, 14:33	72 horas e 25 minutos
<b>Teste 2</b>	04/10/2016, 09:10	06/10/2016, 09:56	48 horas e 46 minutos

Os equipamentos utilizados no teste são todos do Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE. São eles:

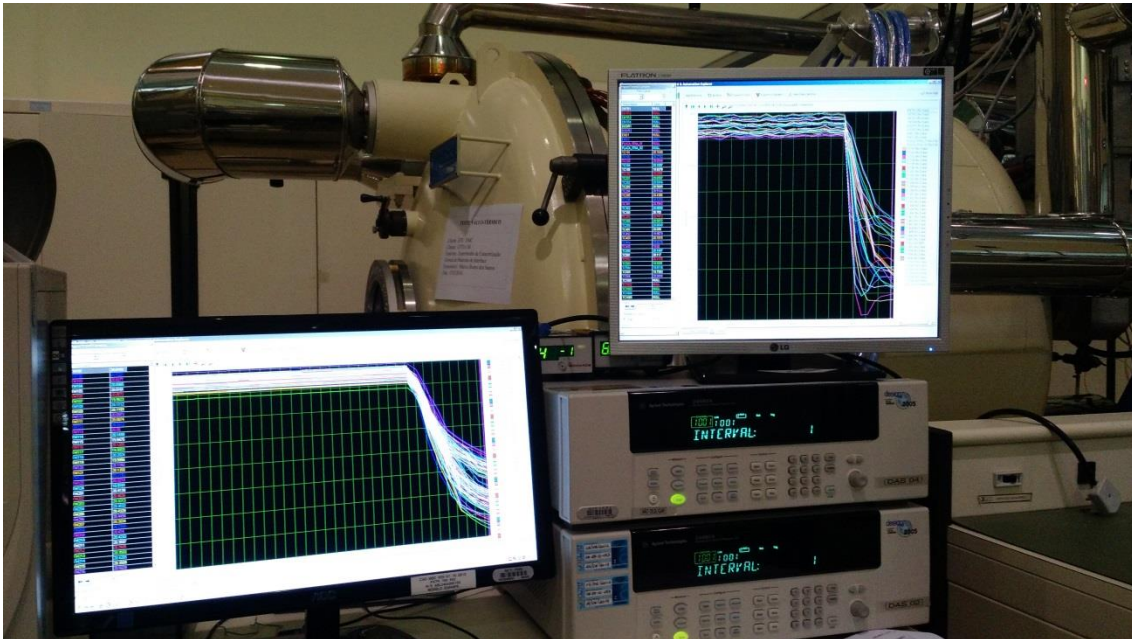
- a. Câmara Vácuo-Térmica CVT 1x1 *High Vacuum Systems Inc.*, utilizada para simulação de vácuo e shroud a -140 °C, Figura 7.1.

Figura 7.1 – CVT 1x1 do LIT



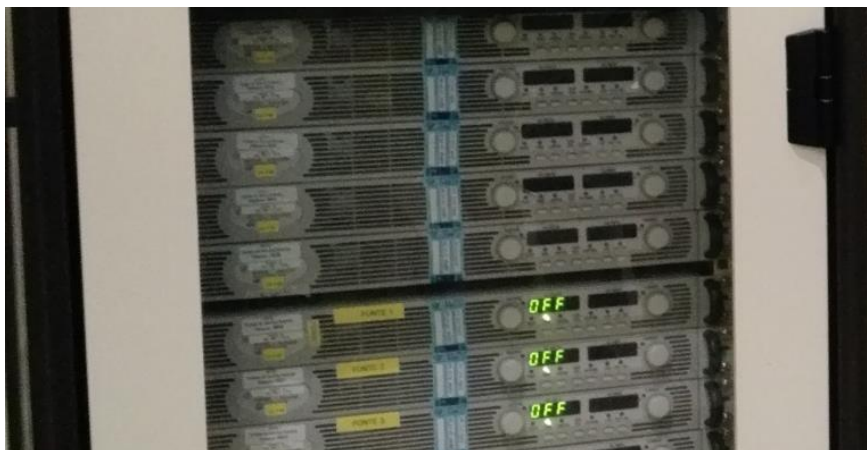
- b. Sistema de aquisição de dados *Agilent Multifunction Switch/Measure Unit 34980A*, combinado com programa de aquisição de dados do LIT, utilizado para ler e gravar todos os dados de temperatura dos termistores, temperatura dos termopares, corrente e tensão das fontes de alimentação e pressão do sistema de vácuo, Figura 7.2.

Figura 7.2 – Sistema de aquisição de dados e software



- c. Fontes de Alimentação são *Agilent DC Power Supply N5750A (150 V, 5 A, 750 W)*, para suprimento de tensão e corrente aos aquecedores do espécime, Figura 7.3.

Figura 7.3 – Rack com as fontes de alimentação



Durante a execução dos testes, a equipe do Laboratório de Integração e Testes (LIT) controlou a temperatura e pressão da câmara CVT 1x1 e a aquisição dos

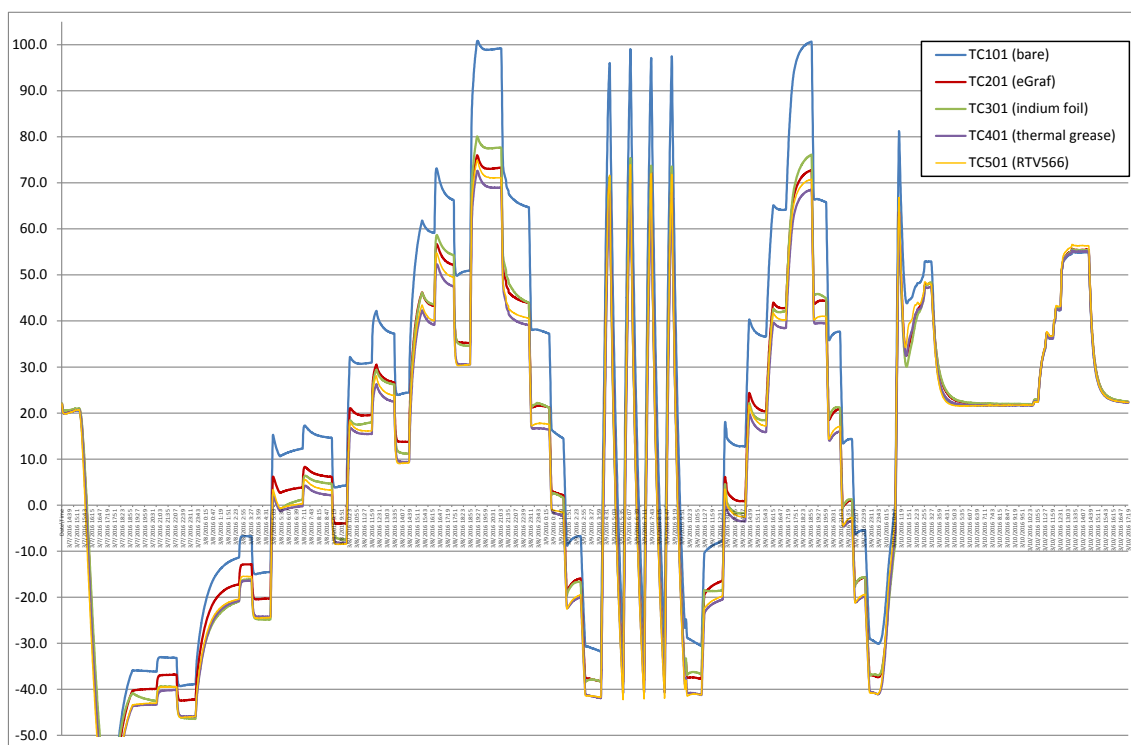
dados, enquanto os aquecedores do espécime foram controlados pela equipe da térmica da ETE (Valeri e Rafael).

Como havia um alvo de temperatura para cada fase do teste, e a temperatura de equilíbrio dos pontos de referência de cada conjunto era diferente para as mesmas potências nos aquecedores, o conjunto com graxa térmica foi escolhido como referência.

## 7.2 Resultados Obtidos no Teste 1

A Figura 7.4 mostra um gráfico geral com a temperatura dos 5 termopares de referência durante o Teste 1, os quais foram instalados no pé escolhido como TRP de cada *dummy*.

Figura 7.4 – Temperatura dos termopares de referência Teste 1 (TRP do *dummy*)

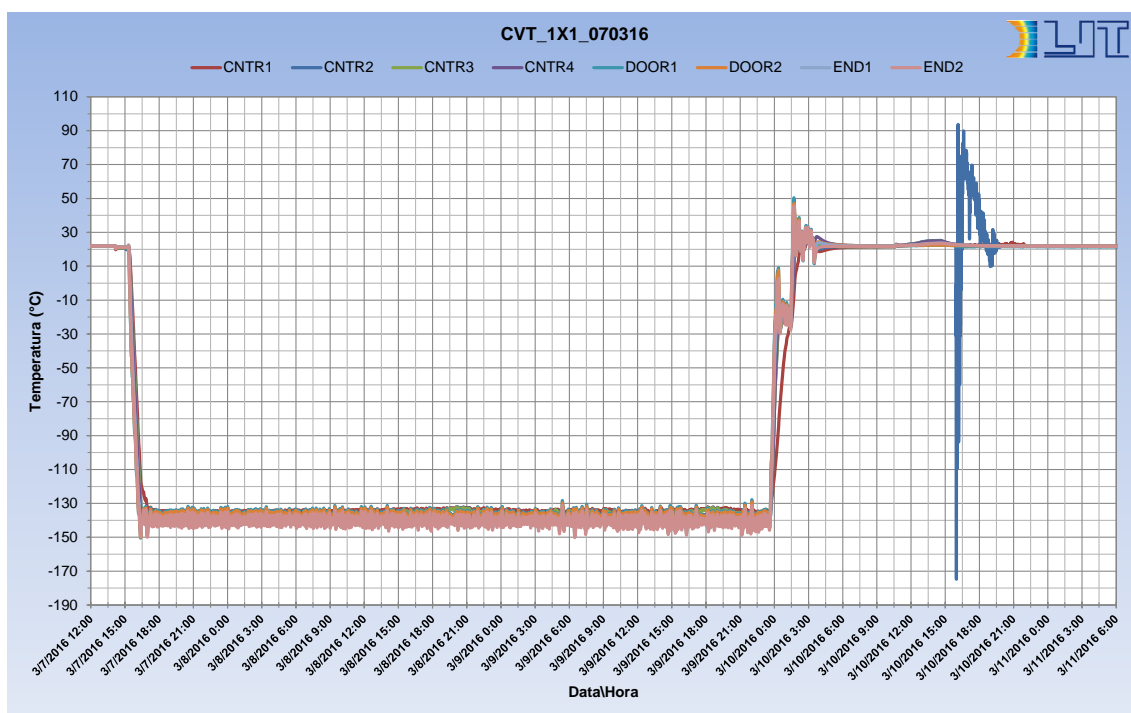


É possível observar claramente que na primeira parte do teste ocorreu a caracterização dos conjuntos em seis patamares de potência, a qual foi

repetida após ciclagem térmica entre -40 e +70 °C. Também nota-se a presença de *overshoot* de temperatura devido à aceleração manual em algumas fases do teste, através do controle de potência dos aquecedores.

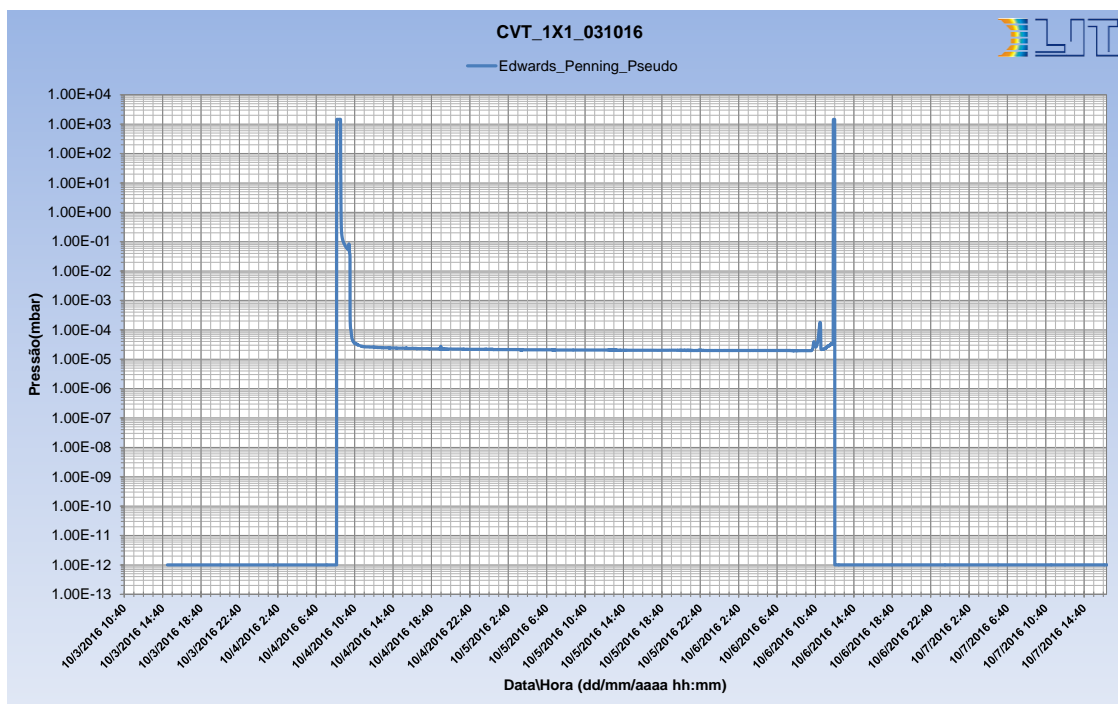
O alvo de temperatura da camisa térmica da CVT foi  $-140 \pm 3^\circ\text{C}$  (este é o limite mínimo desta câmara específica), a qual foi mantida satisfatoriamente durante todo o teste. A Figura 7.5 mostra a distribuição das temperaturas medidas pelos sensores instalados ao longo da camisa térmica da CVT.

Figura 7.5 – Distribuição de temperaturas ao longo da camisa da CVT durante o Teste 1



A pressão da CVT 1x1 m foi mantida a aproximadamente  $1 \times 10^{-4}$  mbar durante toda a execução do teste, Figura 7.6.

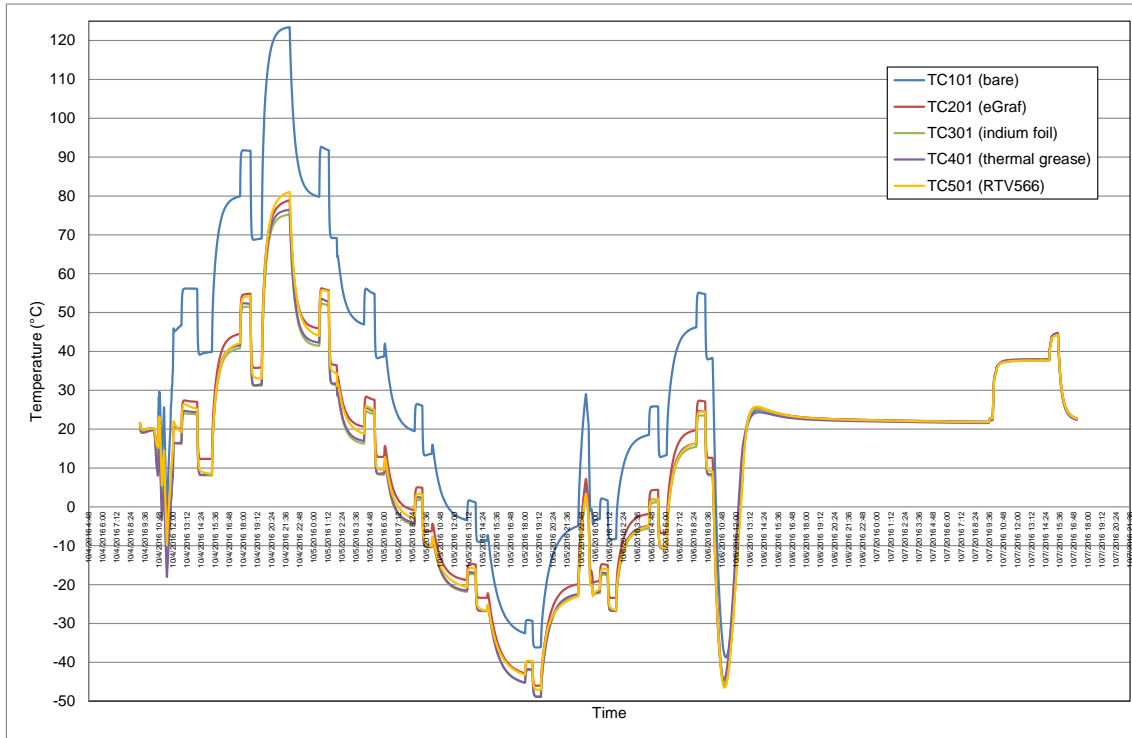
Figura 7.6 – Pressão da CVT durante o Teste 1, sensor Penning



### 7.3 Resultados Obtidos no Teste 2

A Figura 7.7 mostra um gráfico geral com a temperatura dos 5 termopares de referência durante o Teste 2, os quais foram instalados no pé escolhido como TRP do *dummy*.

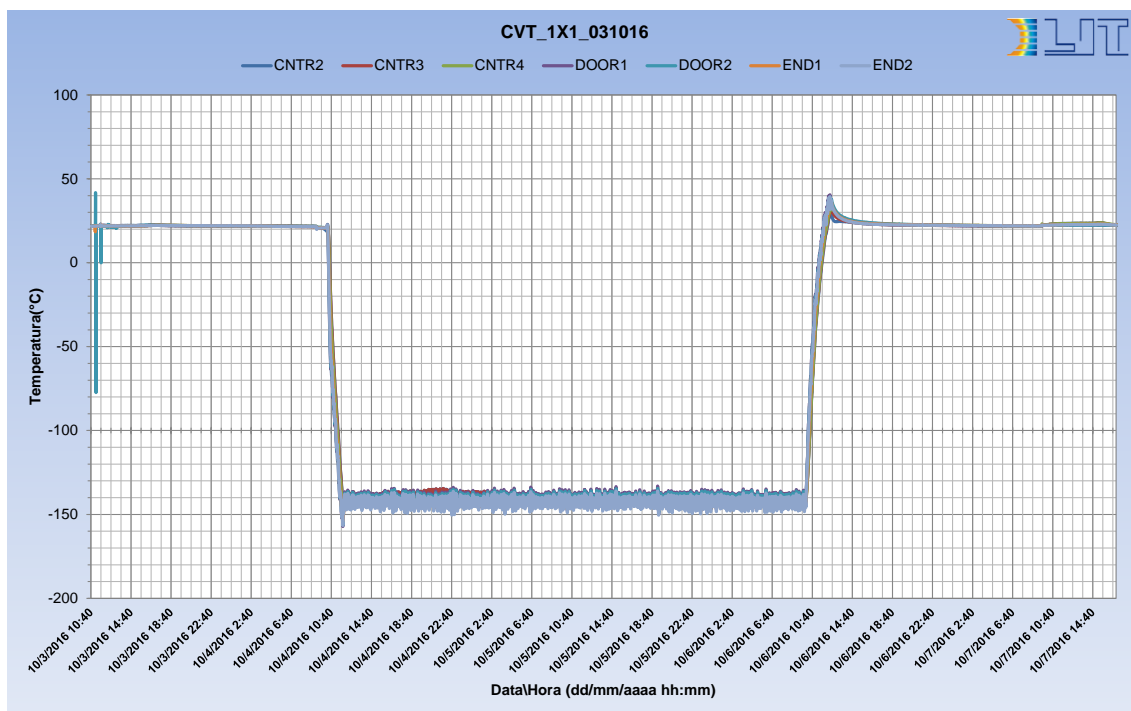
Figura 7.7 - Temperatura dos termopares de referência Teste 2 (TRP do dummy)



É possível observar que durante o teste foi realizada a caracterização dos conjuntos em seis patamares de potência, de forma crescente e decrescente, desta vez não houve aceleração artificial para atingir os patamares durante o teste.

O alvo de temperatura da camisa térmica da CVT era  $-140 \pm 3^{\circ}\text{C}$ . A Figura 7.8 mostra a distribuição das temperaturas medidas pelos sensores instalados ao longo da camisa térmica da CVT.

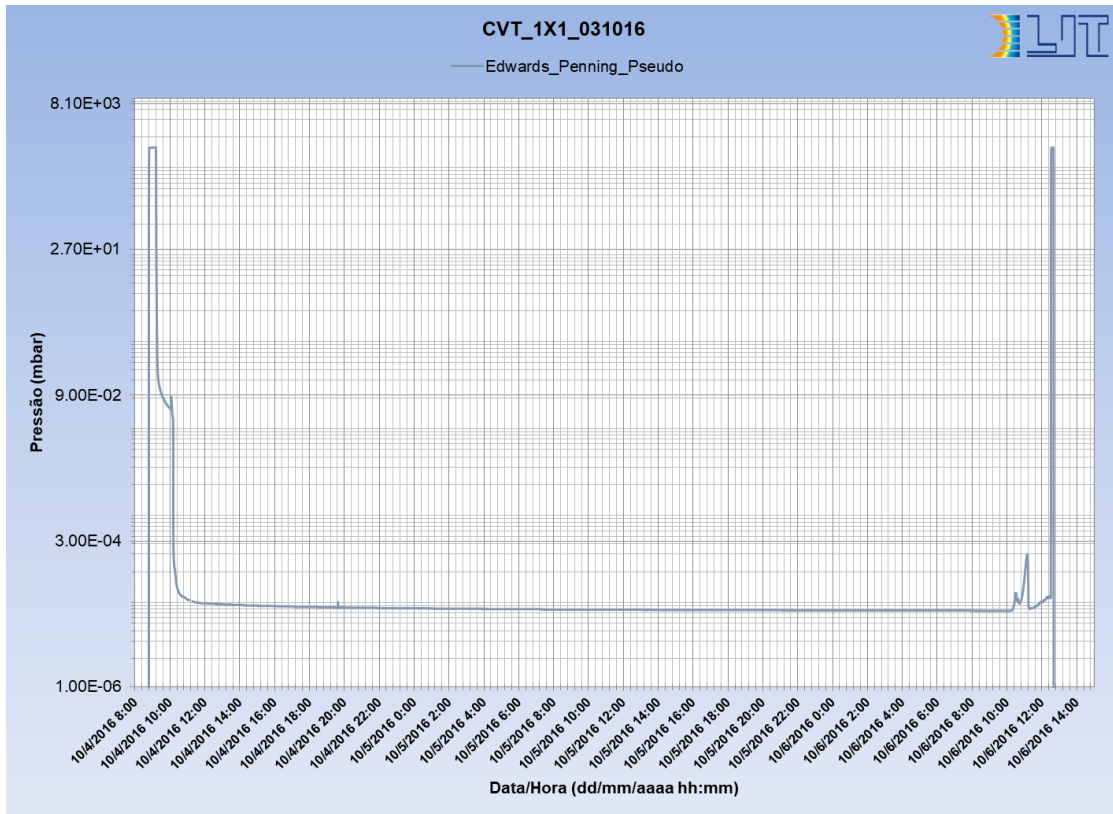
Figura 7.8 - Distribuição de temperaturas ao longo da camisa da CVT durante o Teste 2



A pressão da CVT 1x1 m foi mantida a aproximadamente  $1 \times 10^{-4}$  mbar durante toda a execução do teste, Figura 7.9.



Figura 7.9 - Pressão da CVT durante o Teste 2





## 8 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

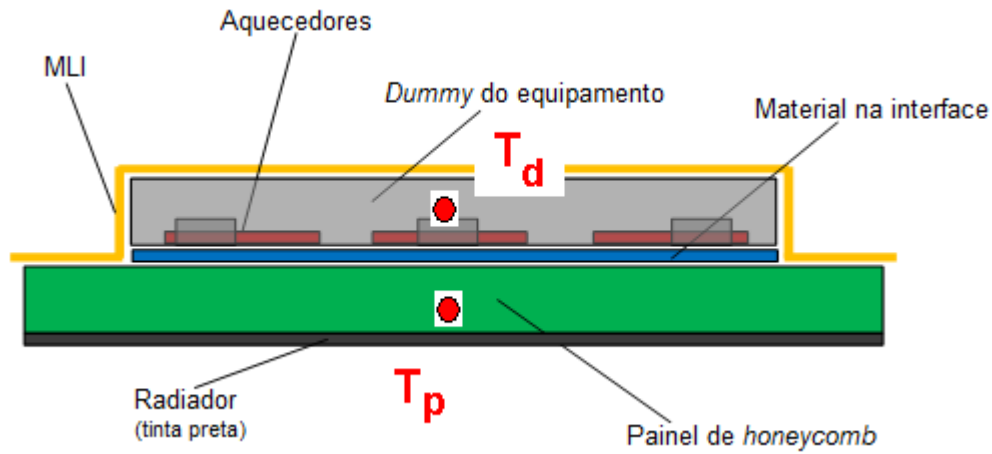
### 8.1 Estimativa da Temperatura de Equilíbrio (*Steady-State*) a Partir de um Modelo Analítico

Durante testes em vácuo, há uma incerteza em como determinar o momento quando o espécime chegou na temperatura de equilíbrio (*steady-state*). Em teoria, deve-se esperar um tempo muito longo, para que isso ocorra dentro de uma tolerância aceitável. É comum estabelecer um critério de convergência baseado na taxa de mudança de temperatura (neste trabalho,  $dT/dt < 0,02$  °C/min) para determinar este momento. Entretanto, este critério é estabelecido por similaridade com outros testes, sendo difícil considerar a inércia e acoplamentos térmicos do conjunto. Para processos lentos e com acoplamento térmicos fracos, especialmente em vácuo, esta abordagem pode resultar no estabelecimento do regime permanente de forma precoce, quando transiente ainda não acabou, mas o critério de convergência é formalmente atingido. Na prática, existe a tendência de encurtar os patamares, uma vez que os testes em vácuo são muito caros. Assim, pode-se introduzir uma distorção nos cálculos dos parâmetros de interesse e nas conclusões finais durante processamento de dados experimentais, uma vez que as temperaturas não atingiram o regime permanente.

Neste trabalho, durante a análise dos dados experimentais observou-se que as condições de regime permanente, embora próximas, não foram plenamente atingidas nos finais de cada fase. Para avaliar e corrigir as temperaturas consideradas em regime permanente nos patamares dos testes, um modelo transiente analítico simplificado, elaborado a partir da abordagem nodal (*lumped capacity analysis method*) foi utilizado.

A Figura 8.1 mostra um desenho esquemático do *dummy* e no painel, indicando suas temperaturas médias.

Figura 8.1 – Desenho esquemático da posição das temperaturas.



Vamos assumir que  $T_d$  é a temperatura média na área de interface no *dummy* e  $T_p$  a temperatura média no painel, ambas na área de interface.

A Equação 8.1 mostra o balanço no nó do *dummy*.

$$Cm_d \frac{dT_d}{dt} = Q - GA_d (T_d - T_p) \quad (8.1)$$

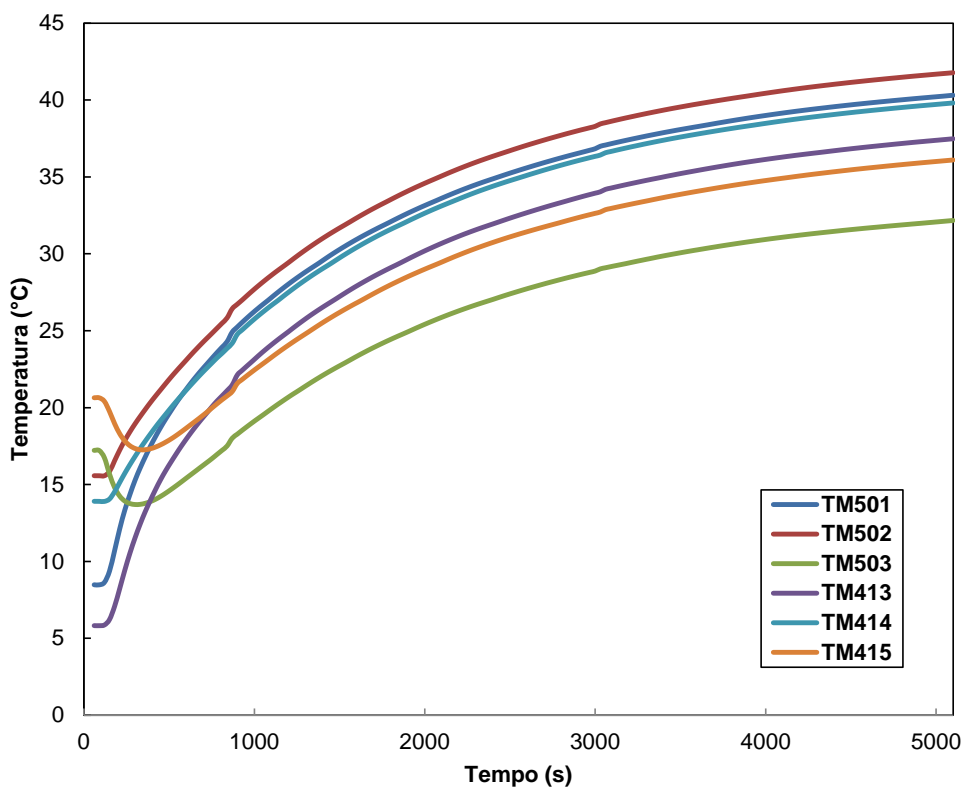
Esta equação mostra que a energia interna do dummy definida pela temperatura média varia em função da diferença entre toda potência  $Q$  dos aquecedores e o calor transferido por condução para o painel através da interface de área  $A_d$ . A Equação 8.2 mostra o balanço semelhante no nó do painel.

$$Cm_p \frac{dT_p}{dt} = GA_d (T_d - T_p) - \varepsilon\sigma A_p (T_p^4 - T_{TVC}^4) \quad (8.2)$$

Toda taxa de calor transferida pela interface será absorvida pela camisa fria da câmara de vácuo, exceto a gasta pela mudança da energia interna do painel. As condições iniciais em  $t=t_1$  são  $T_d(t_1) = T_{d1}$  e  $T_p(t_1) = T_{p1}$ .

A Figura 8.2 mostra, como exemplo, as curvas experimentais de temperaturas transientes do Teste 2, fase 4, para os termopares do painel e do dummy de um mesmo módulo (conjunto) do aparato. Esta característica apresentada pelas curvas são típicas e se repetem nas outras fases e nos outros módulos.

Figura 8.2 – Gráfico com transiente de temperaturas dos dados experimentais



É possível observar que nos finais dos transientes, as temperaturas de todos os elementos do conjunto possuem tendências semelhantes na mudança, ou seja, as suas derivadas são próximas.

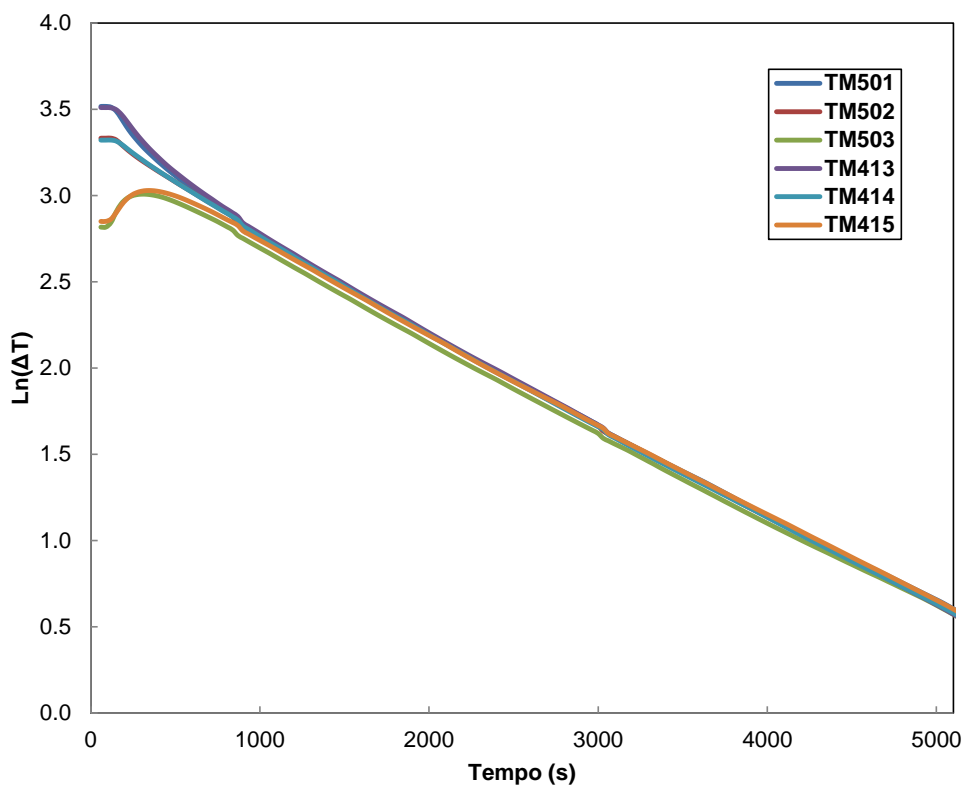
De acordo com Isachenko (1969), os processos transientes se dividem em transiente desordenado, quando há mudança nas condições de contorno e ordenado, quando o transiente entra em um regime em que as derivadas das temperaturas das diferentes partes do sistema são semelhantes.

Para melhor visualização dessa diferença, foi plotado o gráfico mostrado na Figura 8.3 de  $\ln(\Delta T)$  no tempo, seguindo recomendações desta referência, sendo que o  $\Delta T$  é definido pela Equação 8.3.

$$\Delta T = T_i - T_{ss} \quad (8.3)$$

onde  $T_{ss}$  é a temperatura considerada como final de equilíbrio (*steady-state*) durante o teste

Figura 8.3 – Gráfico com transiente de  $\ln(\Delta T)$ , dos dados experimentais, mostrando regimes desordenado (~0-800 s) e ordenado (>~800 s)



Uma vez que os elementos do conjunto são bem acoplados, nota-se que as temperaturas evoluem juntas, indicando que as diferenças entre as temperaturas não se alterarão de forma significativa com a proximidade do estado de regime permanente pleno. Assim, o balanço na fase de regime transiente ordenado, pode ser definido de maneira mais simples, Equação 8.3.

$$\begin{cases} Cm \frac{dT_p}{dt} = Q - \varepsilon \sigma A_p (T_p^4 - T_{TVC}^4) \\ T_d = T_p + \frac{Q}{GA_d} \end{cases} \quad (8.3)$$

sendo que  $T_p(t_1) = T_{p1}$

Neste caso, a capacitância térmica  $Cm$  de todo o conjunto *dummy*-painel é considerada.

Em equilíbrio, quando  $t \rightarrow \infty$ , as derivadas são iguais a zero e as temperaturas chegam nos valores de equilíbrio  $\hat{T}_p$  e  $\hat{T}_d$ , e o balanço fica de acordo com a Equação 8.4.

$$Q - \varepsilon \sigma A_p (\hat{T}_p^4 - T_{TVC}^4) = 0 \quad (8.4)$$

Pode-se considerar as diferenças de temperaturas relativas às temperaturas de equilíbrio

$$\Delta T_p = T_p - \hat{T}_p \rightarrow T_p = \Delta T_p + \hat{T}_p \quad (8.5)$$

Como há interesse somente nos finais dos transientes, quando a diferença de temperatura  $\Delta T$  é muito pequena, pode-se aplicar uma linearização para  $T_p^4$  usando  $\Delta T$ , Equação 8.6.

$$T_p^4 = (\hat{T}_p + \Delta T)^4 \approx \hat{T}_p^4 + 4\hat{T}_p^3 \Delta T_p \quad (8.6)$$

Fazendo a substituição de  $T_p^4$  linearizado na Equação 8.3, de balanço de temperatura no painel, temos que:

$$Cm \frac{dT_p}{dt} = Q - \varepsilon \sigma A_p (\hat{T}_p^4 + 4\hat{T}_p^3 \Delta T_p - T_{TVC}^4) \quad (8.7)$$

$$Cm \frac{dT_p}{dt} = Q - \varepsilon \sigma A_p (\hat{T}_p^4 - T_{TVC}^4) - \varepsilon \sigma A_p 4\hat{T}_p^3 \Delta T_p \quad (8.8)$$

Os dois primeiros termos à direita da igualdade formam um balanço de regime permanente e são iguais a zero. As derivadas de  $T_p$  e  $\Delta T_p$  são iguais. Assim, pode-se simplificar:

$$Cm \frac{d\Delta T_p}{dt} = -\varepsilon \sigma A_p 4\hat{T}_p^3 \Delta T_p \quad (8.9)$$

$$\frac{Cm}{(\varepsilon \sigma A_p 4\hat{T}_p^3)} \frac{d\Delta T_p}{dt} = -\Delta T_p \quad (8.10)$$

Para se chegar em uma forma mais compacta, pode-se observar que o termo que está a frente da derivada é a constante de tempo.



$$\tau = \frac{cm}{\varepsilon\sigma A_p 4\hat{T}_p^3} \quad (8.11)$$

Fazendo a substituição na Equação 8.10, temos que:

$$\tau \frac{d\Delta T_p}{dt} = -\Delta T_p \quad (8.12)$$

Pode-se generalizar ainda mais, uma vez que as derivadas de temperaturas de todos elementos são praticamente iguais. Assim pode-se deixar de usar o subscrito p, pois esta equação é válida para qualquer elemento do conjunto.

$$\tau \frac{d\Delta T}{dt} = -\Delta T \quad (8.13)$$

Finalmente, chega-se na equação clássica de sistemas lineares e invariantes no tempo (*LTI Systems*).

Assim, chega-se à seguinte solução analítica para as condições iniciais  $\Delta T(t_1) = \Delta T_1$ .

$$\Delta T = \Delta T_1 e^{\frac{t_1-t}{\tau}} \quad (8.14)$$

Tomando um período do teste, no final do patamar, entre os tempos  $t_1$  e  $t_2$ , assumindo que ainda não se chegou no regime permanente e substituindo as temperaturas no lugar das diferenças de temperatura, temos que:

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 e^{\frac{t_1-t}{\tau}} \quad (8.15)$$

$$(T_2 - \hat{T}) = (T_1 - \hat{T})e^{\frac{t_1-t}{\tau}} \quad (8.16)$$

Dos dados experimentais, podemos obter os valores das temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  nos tempos  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente.

Sabendo o valor da constante de tempo  $\tau$ , a temperatura do regime permanente  $\hat{T}$  (incógnita) pode ser obtida através da Equação 8.17.

$$\hat{T} = T_2 = \frac{(T_2 - T_1)}{e^{\frac{(t_2-t_1)}{\tau}} - 1} \quad (8.17)$$

O constante do tempo é calculado pela Equação 8.11. Entretanto, como opção simplificada, a mesma pode ser extraída das curvas experimentais, Gordon (1965).

A constante de tempo  $\tau$  é função de vários parâmetros, incluindo a temperatura de regime permanente  $\hat{T}$ . Ela pode ser calculada a partir da definição (Equação 8.11), mas usando a temperatura  $T_2$  como referência no lugar da temperatura  $\hat{T}$ , uma vez que estas temperaturas tem valores muito próximos.

$$\tau \approx \frac{cm}{\varepsilon\sigma A_p 4T_2^3} \quad (8.18)$$

O erro desta substituição pode ser avaliado na maneira clássica:

$$\delta\tau = \frac{\partial\tau}{\partial T} \delta T \rightarrow \delta\tau = \frac{3cm}{\varepsilon\sigma A_p 4T_2^4} \delta T \quad (8.19)$$

Assim, o erro relativo é:

$$\frac{\delta\tau}{\tau} = \frac{1}{\tau} \frac{\partial\tau}{\partial T} \delta T \quad (8.20)$$

Substituindo as Equações 8.18 e 8.19 na Equação 8.20, tem-se que:

$$\frac{\delta\tau}{\tau} = - \left( \frac{\varepsilon\sigma A_p 4T_2^3}{cm} \right) \left( \frac{3cm}{\varepsilon\sigma A_p 4T_2^4} \right) \delta T = - \frac{\delta T}{T_2} \quad (8.21)$$

Para valores típicos, como por exemplo  $\delta T = 3 \text{ °C}$  e  $T = 293 \text{ K}$ , o erro no valor da constante de tempo é da ordem de 1% e pode ser considerado desprezível. Entretanto, um fator de ajuste  $f$  é recomendado para refinamento com curvas experimentais:

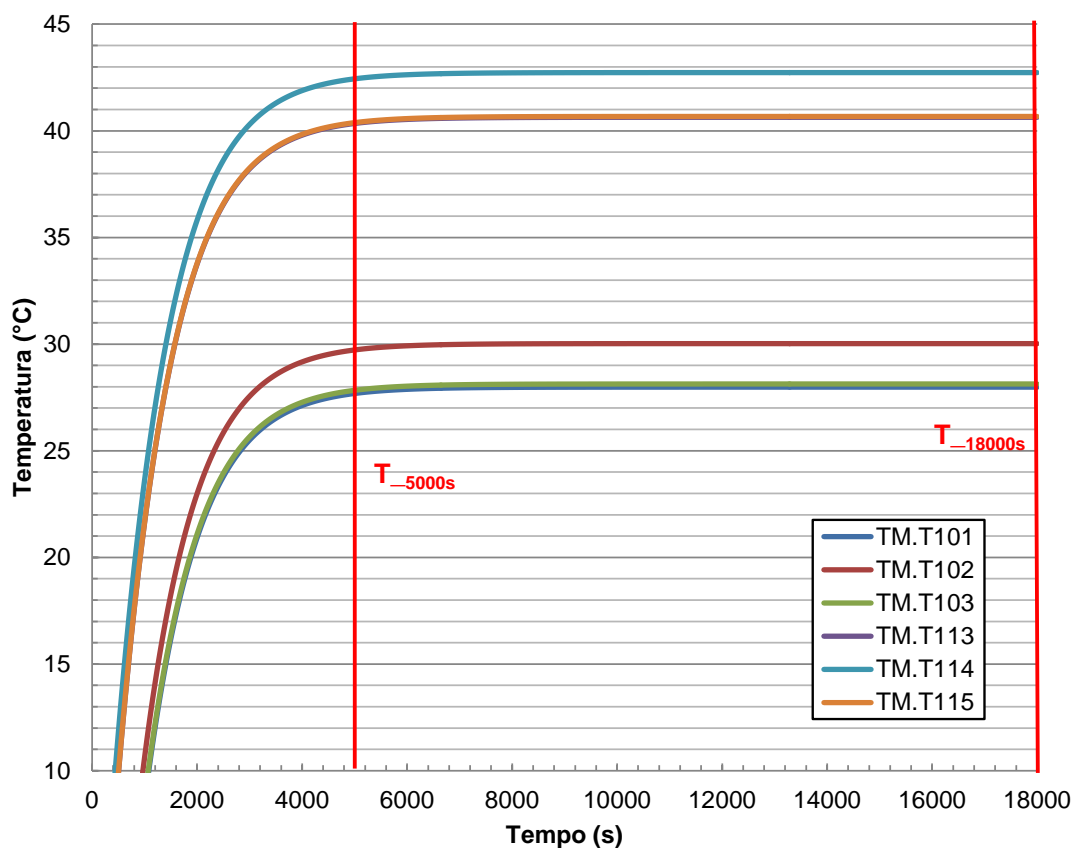
$$\tau = f \frac{cm}{\varepsilon\sigma A_p 4T_2^3} \quad (8.22)$$

onde o valor esperado para  $f$  é próximo de 1.

Para validar a metodologia, o TMM detalhado apresentado a seguir no Capítulo 9 foi utilizado.

Foi executada a simulação de um transiente longo de cinco horas, ou dezoito mil segundos a fim de se chegar nos valores de temperatura de regime permanente. O caso utilizado foi a Fase 10 do Teste 1, com a interface simulando o acoplamento com graxa térmica, Figura 8.4.

Figura 8.4 – Gráfico com as curvas de temperatura do TMM para validação da metodologia



O tempo de cinco mil segundos foi selecionado com o ponto em que o critério de convergência de variação menor que  $0,02 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$  foi atingido. Nesse tempo, foi calculada a constante de tempo utilizando a Equação 8.22 e posteriormente calculada a temperatura de regime permanente utilizando a Equação 8.17.

Os valores das temperaturas para todos os sensores do conjunto D4P3 são mostrados na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Valores de temperatura obtidos pelo TMM detalhado para validação da metodologia

<b>Termistor</b>	<b>T<sub>5000s</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>ss</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>18000s</sub> (°C)</b>	<b>Diferença (°C)</b>
TM401	27,7	28,0	28,1	0,1
TM402	29,7	30,0	30,1	0,1
TM403	27,8	28,1	28,3	0,1
TM404	30,4	30,7	30,8	0,1
TM405	30,5	30,8	30,9	0,1
TM406	32,5	32,8	32,9	0,1
TM407	38,8	39,0	39,1	0,1
TM408	34,4	34,7	34,8	0,1
TM409	35,0	35,3	35,4	0,1
TM410	42,2	42,5	42,6	0,1
TM411	34,5	34,8	34,9	0,1
TM412	31,9	32,2	32,3	0,1
TM313	40,3	40,6	40,7	0,1
TM314	42,4	42,7	42,8	0,1
TM315	40,4	40,7	40,7	0,1
TM316	42,0	42,3	42,4	0,1
TM317	42,1	42,4	42,4	0,1
TM318	44,2	44,5	44,6	0,0
TM319	41,7	42,0	42,1	0,1
TM320	42,9	43,2	43,3	0,1
TM321	42,3	42,5	42,6	0,1
TM322	42,5	42,8	42,8	0,1
TM323	43,0	43,2	43,3	0,1
TM324	41,8	42,0	42,1	0,1

É possível observar que a metodologia para aproximação das temperaturas de regime permanente chega em temperaturas muito próximas do regime permanente, com diferença máxima de 0,1 °C, o que está dentro da tolerância do sensor.

Esta mesma metodologia foi aplicada em todos os dados experimentais obtidos nos dois testes. Para ilustrar como as temperaturas obtidas experimentalmente foram ajustadas e aproximadas para o regime permanente, mostra-se o exemplo de alguns sensores do Teste 2, fase 4, apresentados na Figura 8.2. Os resultados para os dados ajustados são apresentados na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Valores corrigidos para o Teste 2, Fase 4, apenas para o conjunto D5P4 (RTV566)

Sensor	T <sub>critério</sub> (°C)	T <sub>ss</sub> (°C)	ΔT <sub>correção</sub> (°C)
TM501	42,1	42,8	0,6
TM502	43,6	44,2	0,6
TM503	33,9	34,6	0,7
TM504	44,4	45,0	0,6
TM505	43,9	44,5	0,6
TM506	46,3	46,9	0,6
TM507	50,1	50,6	0,5
TM508	54,8	55,3	0,5
TM509	53,3	53,9	0,5
TM510	56,1	56,6	0,5
TM511	53,2	53,8	0,5
TM512	48,4	49,0	0,6
TM413	39,3	39,9	0,6
TM414	41,6	42,2	0,6
TM415	37,9	38,6	0,7
TM416	41,5	42,1	0,6
TM417	40,9	41,5	0,6
TM418	41,0	41,6	0,6
TM419	25,4	26,2	0,7
TM420	28,1	28,7	0,6
TM421	27,8	28,4	0,6
TM422	28,4	29,0	0,6
TM423	28,0	28,7	0,7
TM424	26,7	27,4	0,7

É interessante notar que a correção para os sensores correspondentes na mesma coordenada xy é muito próxima, ou seja, a correção não altera significativamente os valores de ΔT usados para analisar os dados experimentais neste trabalho.

## 8.2 Mapas de Diferença de Temperatura

Conforme mostrado anteriormente, os conjuntos foram instrumentados com 24 sensores de temperatura cada, em 12 posições correspondentes, sendo possível medir a diferença de temperatura nestas posições, Equação 8.23.

$$\Delta T_i = T_{dummy,i} - T_{panel,i} \quad (8.23)$$

Os valores de temperatura em regime permanente foram corrigidos usando metodologia apresentada no Subcapítulo 8.1.

Cada diferença de temperatura caracteriza a razão de dois parâmetros - o fluxo de calor local,  $q_i$  ( $W/m^2$ ) e o coeficiente de transferência de calor,  $h_i$  ( $W/m^2/^\circ C$ ), Equação 8.24.

$$\frac{q_i}{h_i} = \Delta T_i \quad (8.24)$$

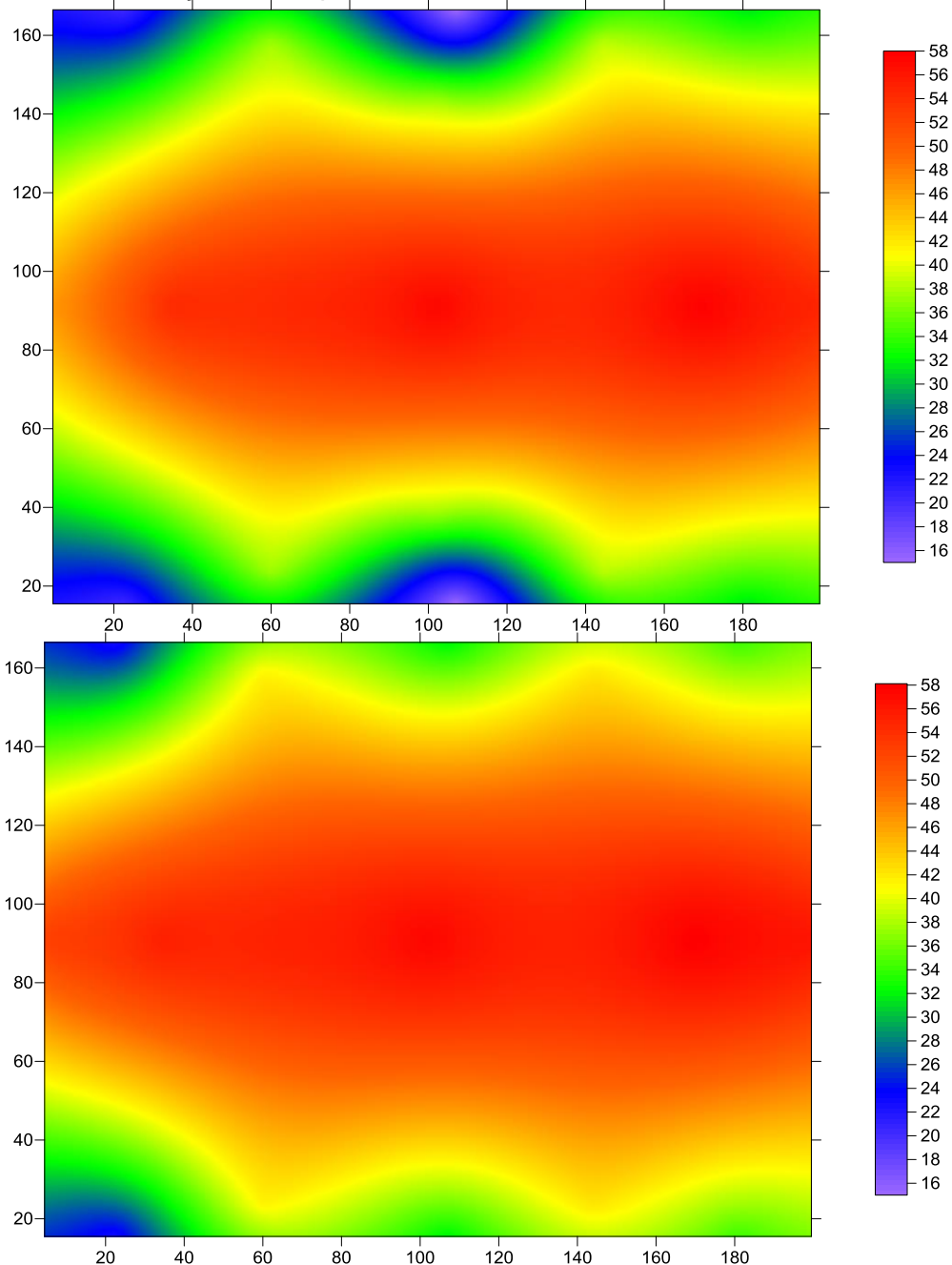
Uma vez que a distribuição do fluxo de calor ao longo da área de interface e consequentemente o fluxo local  $q_i$  não são conhecidos, a extração de  $h_i$  não se torna uma tarefa trivial, isso será possível somente usando TMM detalhado, que é apresentado no Capítulo 9. Entretanto, a distribuição da  $\Delta T$  ao longo da área da interface caracteriza o contato térmico de modo natural e permite realizar algumas comparações e tirar conclusões importantes.

Para facilitar a visualização das diferenças de temperatura medidas em cada posição ( $\Delta T_i$ ) ao longo da interface em cada um dos conjuntos, foram plotados mapas com interpolação das  $\Delta T_i$  com dados da aquisição das 12 posições, utilizando o programa *Surfer 10*. As abas de fixação dos *dummies* foram excluídas nos mapas. Os pontos de medida foram espelhados para uma visualização mais agradável, porém não se pode afirmar que a interface tem acoplamento térmico simétrico, como já apresentado no Capítulo 4.

Os mapas de  $\Delta T$  são mostrados para o Teste1/Fase20@+20 °C em comparação (mesma escala) com o Teste2/Fase13@+20 °C, ou seja, antes e depois da estocagem de seis meses, Figura 8.5 a Figura 8.9. A potência

aplicada foi de 24,6 W em cada conjunto, à temperatura de +20 °C se refere a temperatura alvo no TRP do *dummy*.

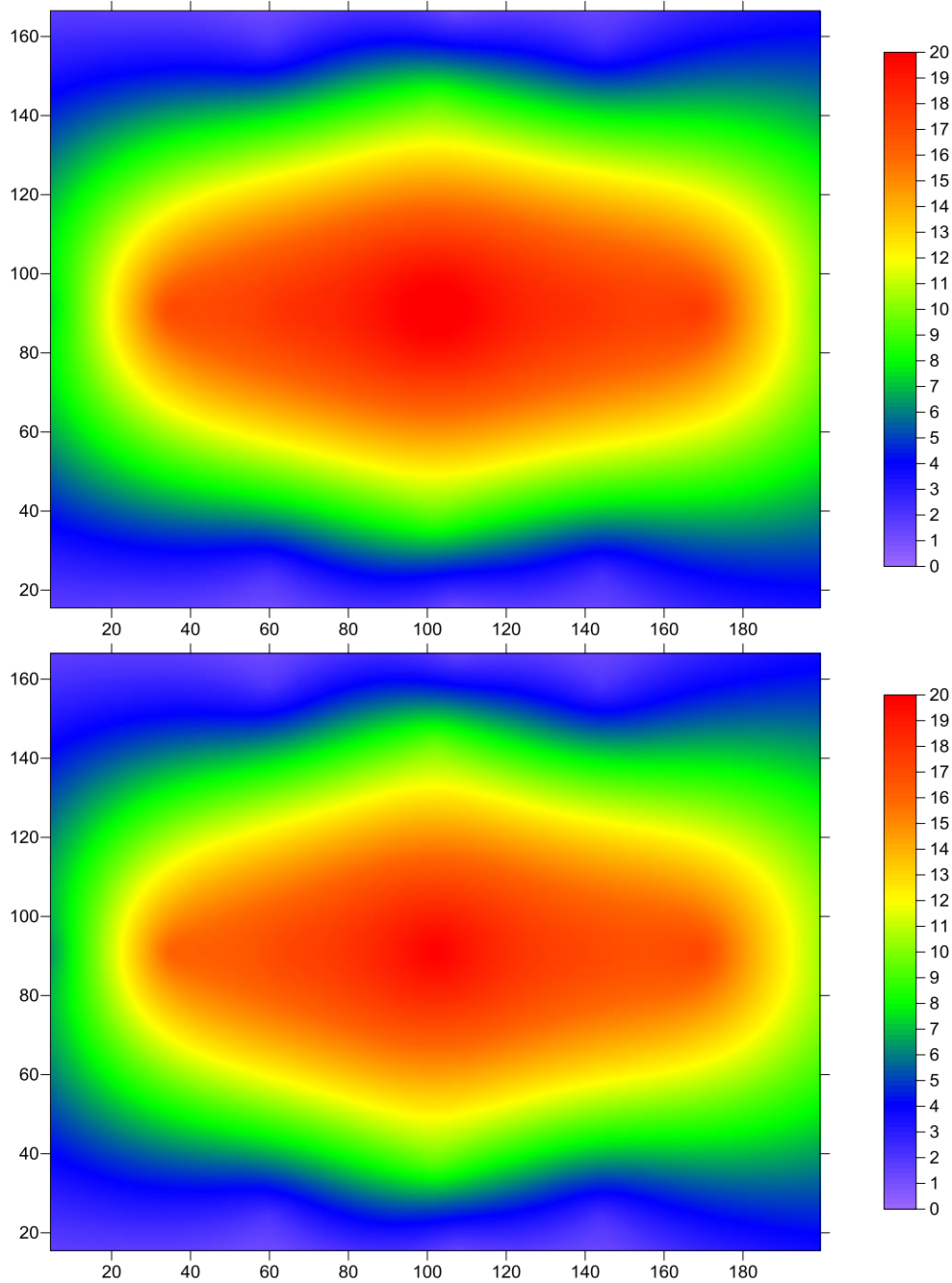
Figura 8.5 – Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – sem material





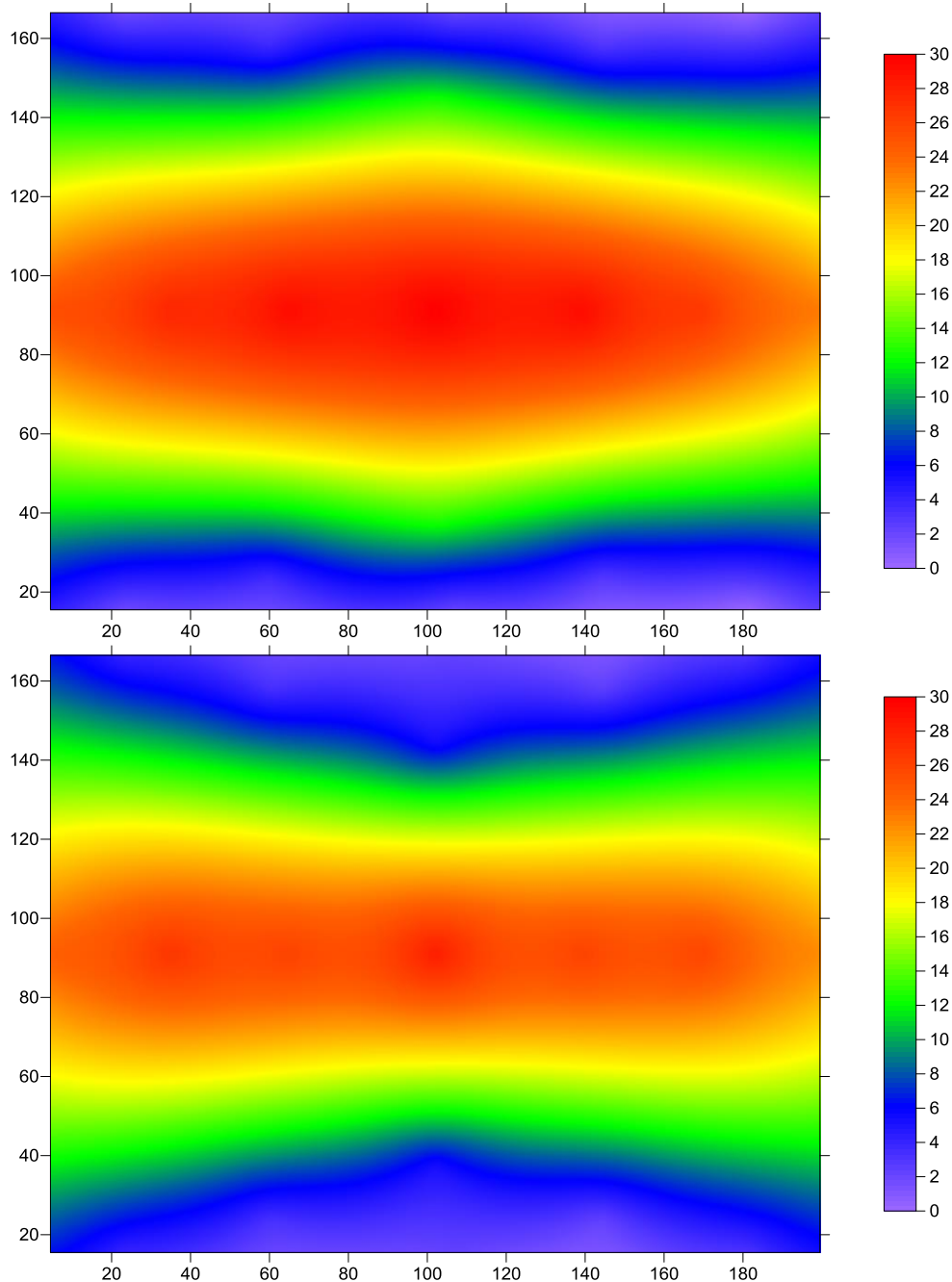
Nota-se um pequeno aumento de  $\Delta T$  na região dos parafusos, mas não muito relevante.

Figura 8.6 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – eGraf



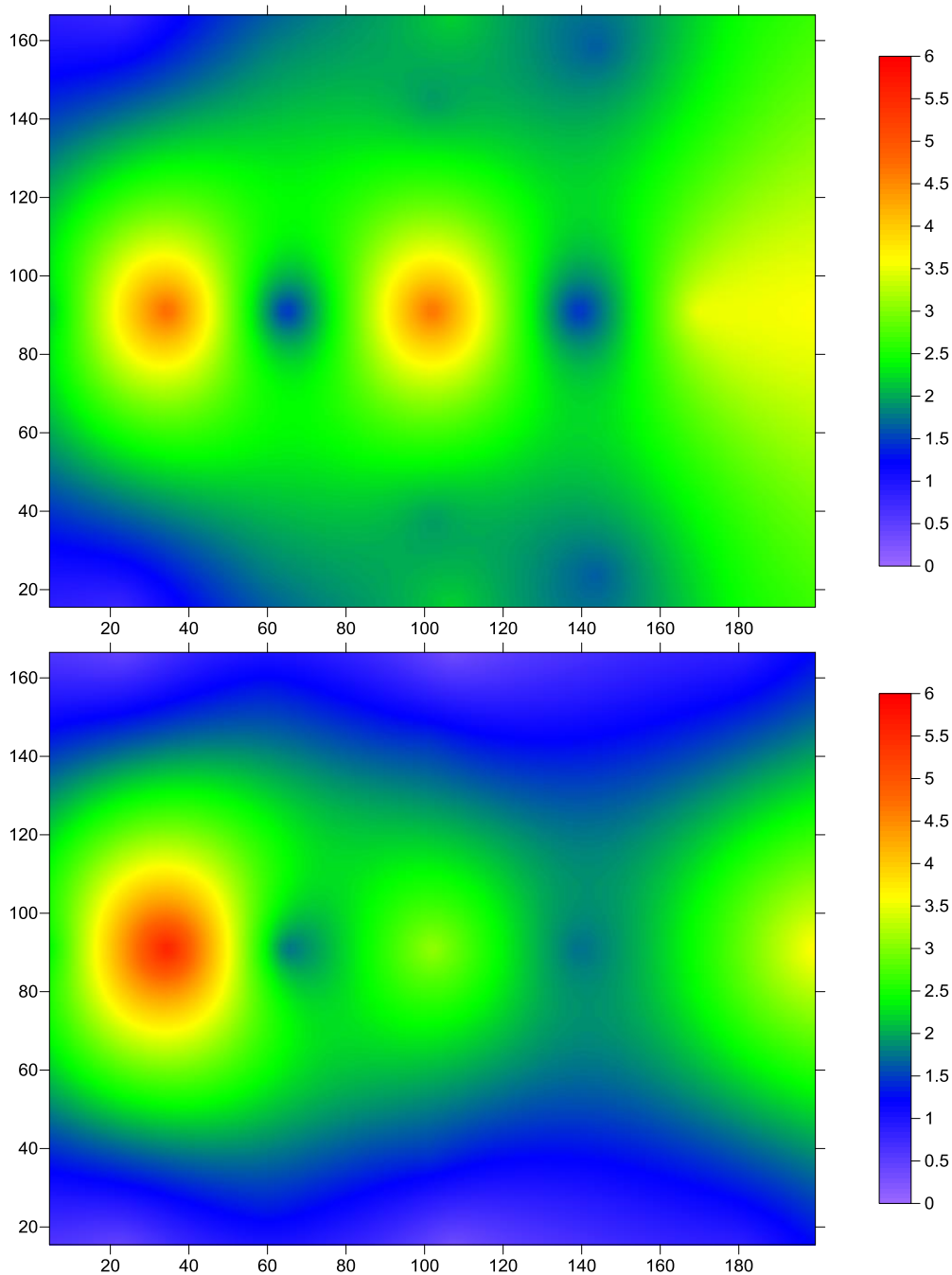
Nota-se uma pequena diminuição nas  $\Delta T_s$  na região central, o que pode indicar uma acomodação melhor do material e melhora de desempenho.

Figura 8.7 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – folha de índio



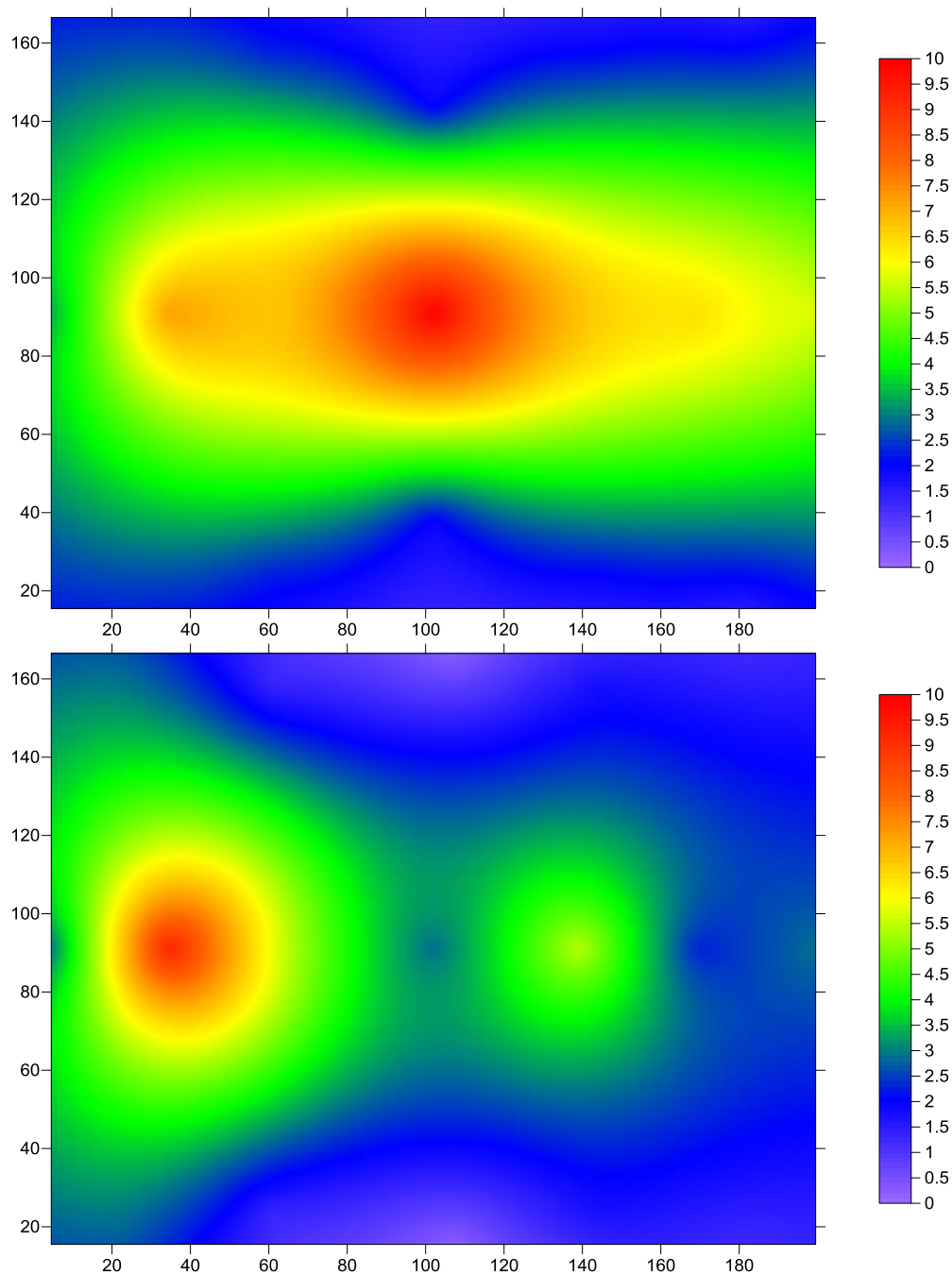
Também, nota-se uma pequena diminuição nas  $\Delta T_s$  na região central, o que pode indicar uma acomodação melhor do material e melhora de desempenho térmico.

Figura 8.8 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – graxa térmica



É possível observar valores baixos de  $\Delta T_s$ , o que indica bom contato. Após estocagem, observa-se uma pequena diminuição nas  $\Delta T_s$  na região dos parafusos e aumento na região central localizado. Isso pode ser resultado da superposição dos efeitos de acomodação degradação de desempenho na região central.

Figura 8.9 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@20 °C/24.6 W – RTV566

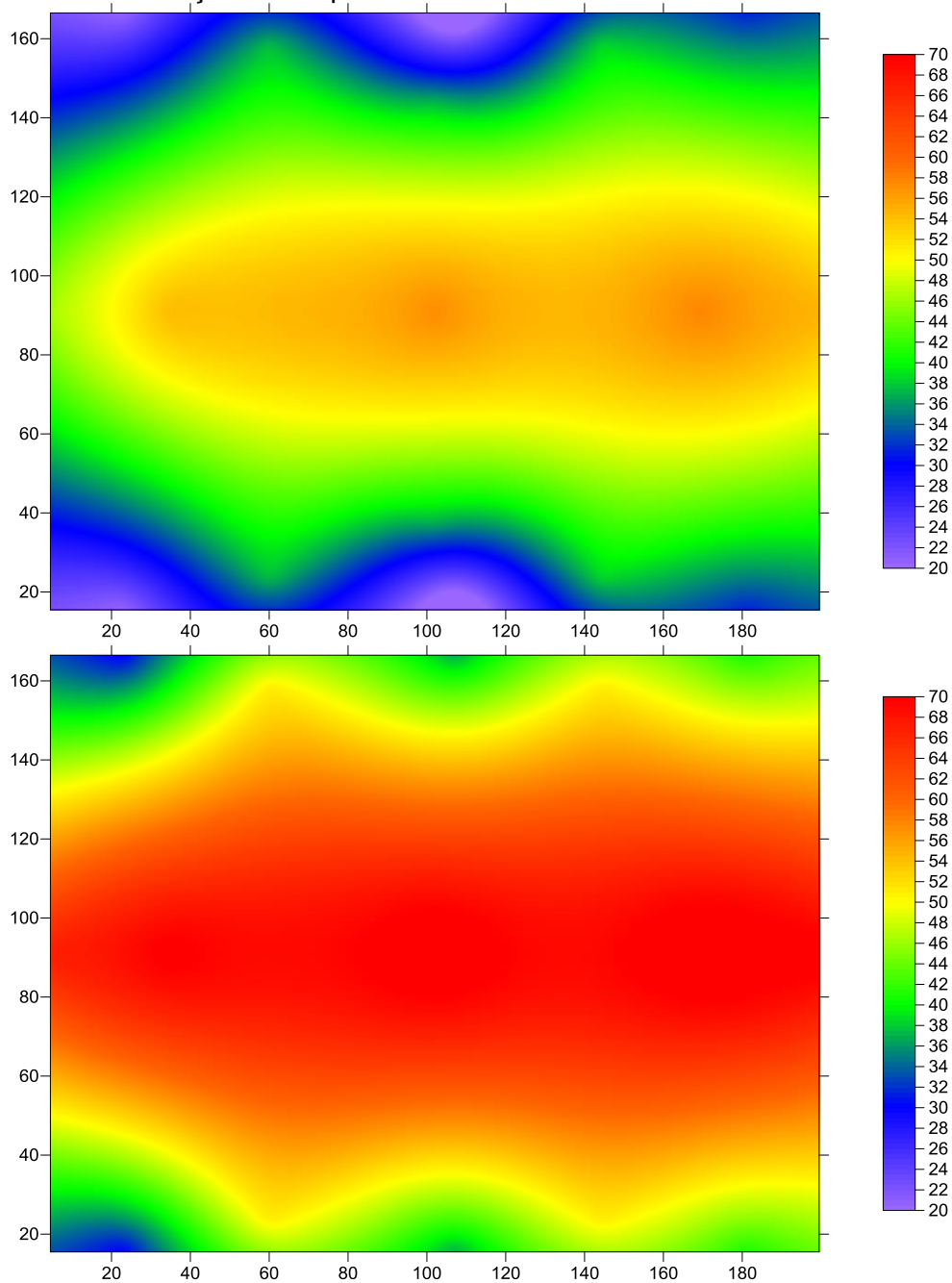


Nota-se uma diminuição geral nas  $\Delta T_s$  depois da estocagem, o que pode indicar uma acomodação melhor do material e melhora de desempenho.

Ainda, os mapas de  $\Delta T$  são mostrados para outro nível de temperatura, de +45 °C, também antes e depois da estocagem de seis meses. O

Teste1/Fase13@+45 °C, é mostrado em comparação com o Teste2/Fase4@+45 °C, ambos com potência aplicada de 33,4 W por conjunto, conforme Figura 8.10 a Figura 8.14. A temperatura de +45 °C se refere à temperatura alvo no TRP do *dummy*.

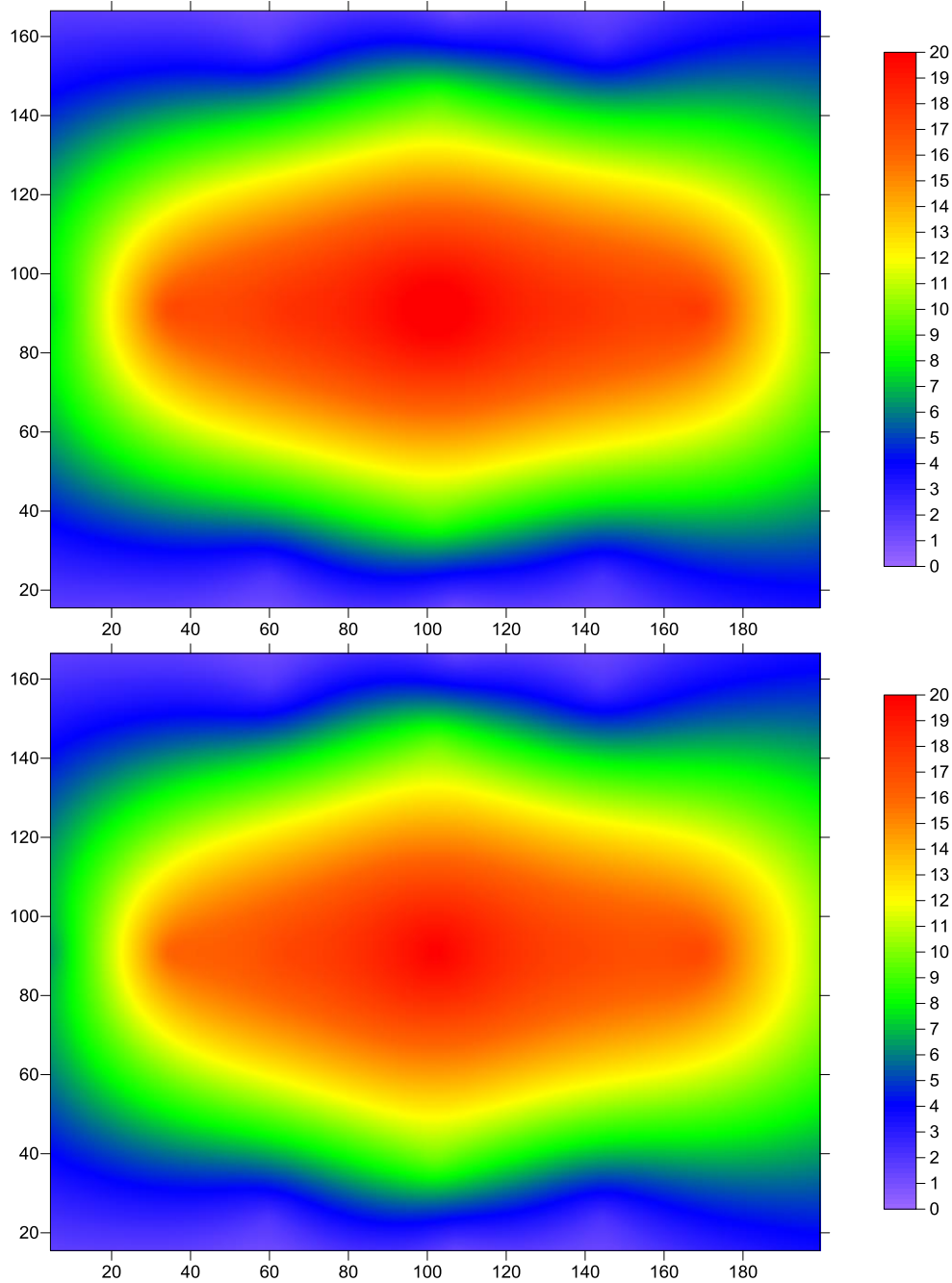
Figura 8.10 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – sem material



Neste caso, sem material na interface, as diferenças de temperatura ficaram maiores depois da estocagem, o que indica piora no contato. Uma possível explicação poderia estar ligada a redução da contribuição do componente de transferência de calor por condução na interface pela formação e aumento

gradual durante 6 meses da camada de óxido  $\text{Al}_2\text{O}_3$  depositada nas microcavidades da superfície rugosa.

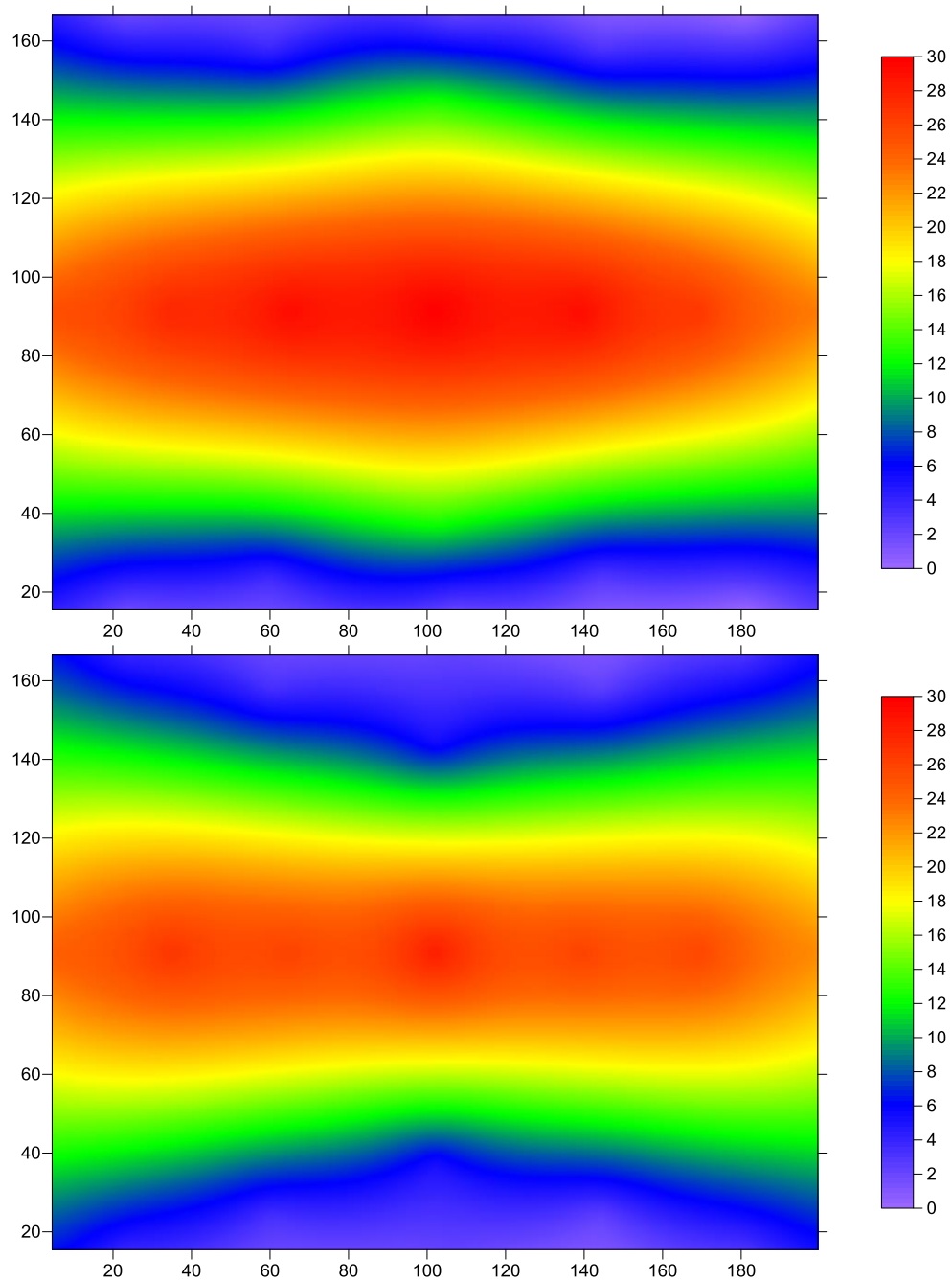
Figura 8.11 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – eGraf





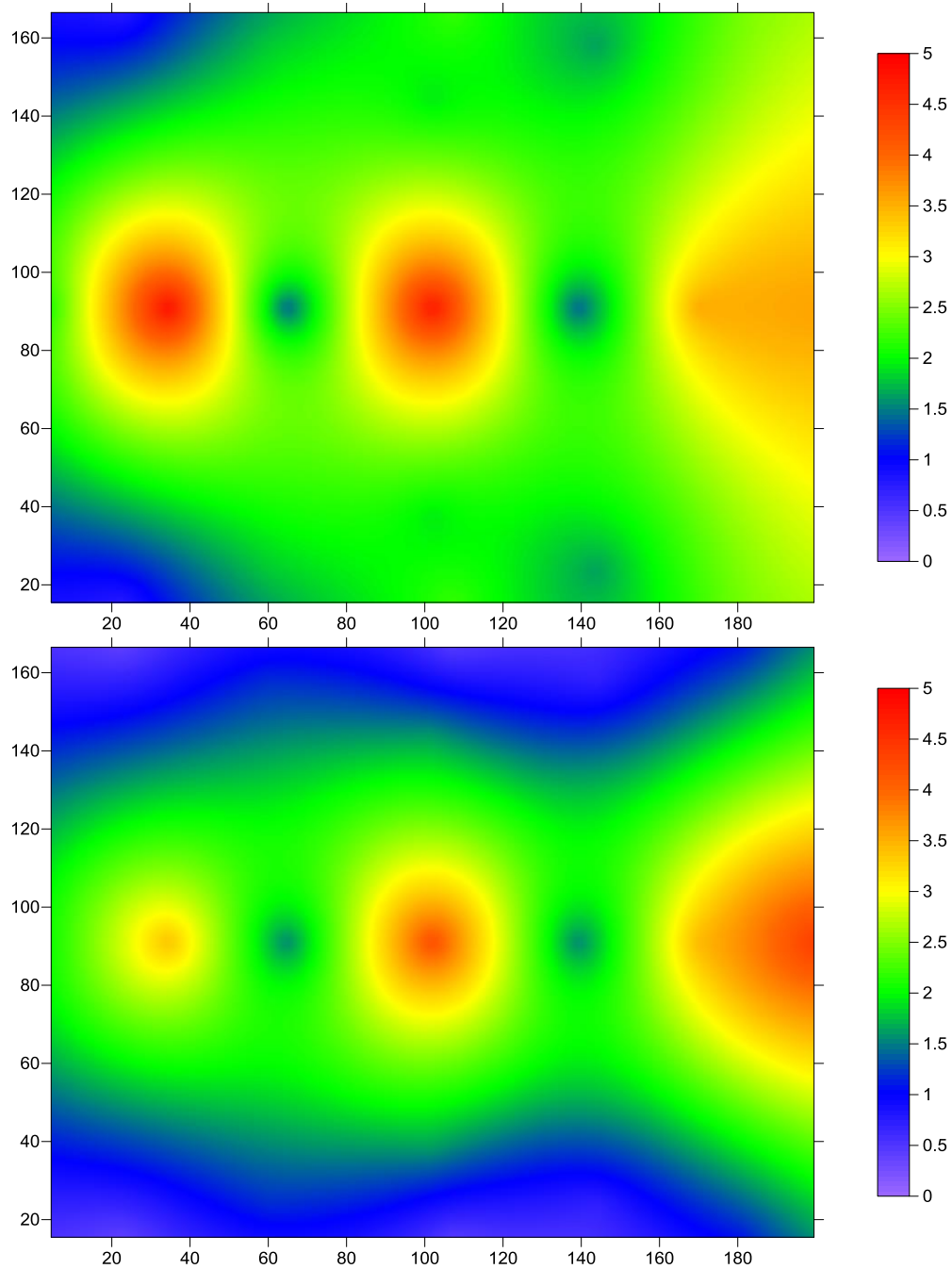
Não houve mudanças no conjunto com eGraf após a estocagem.

Figura 8.12 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – folha de índio



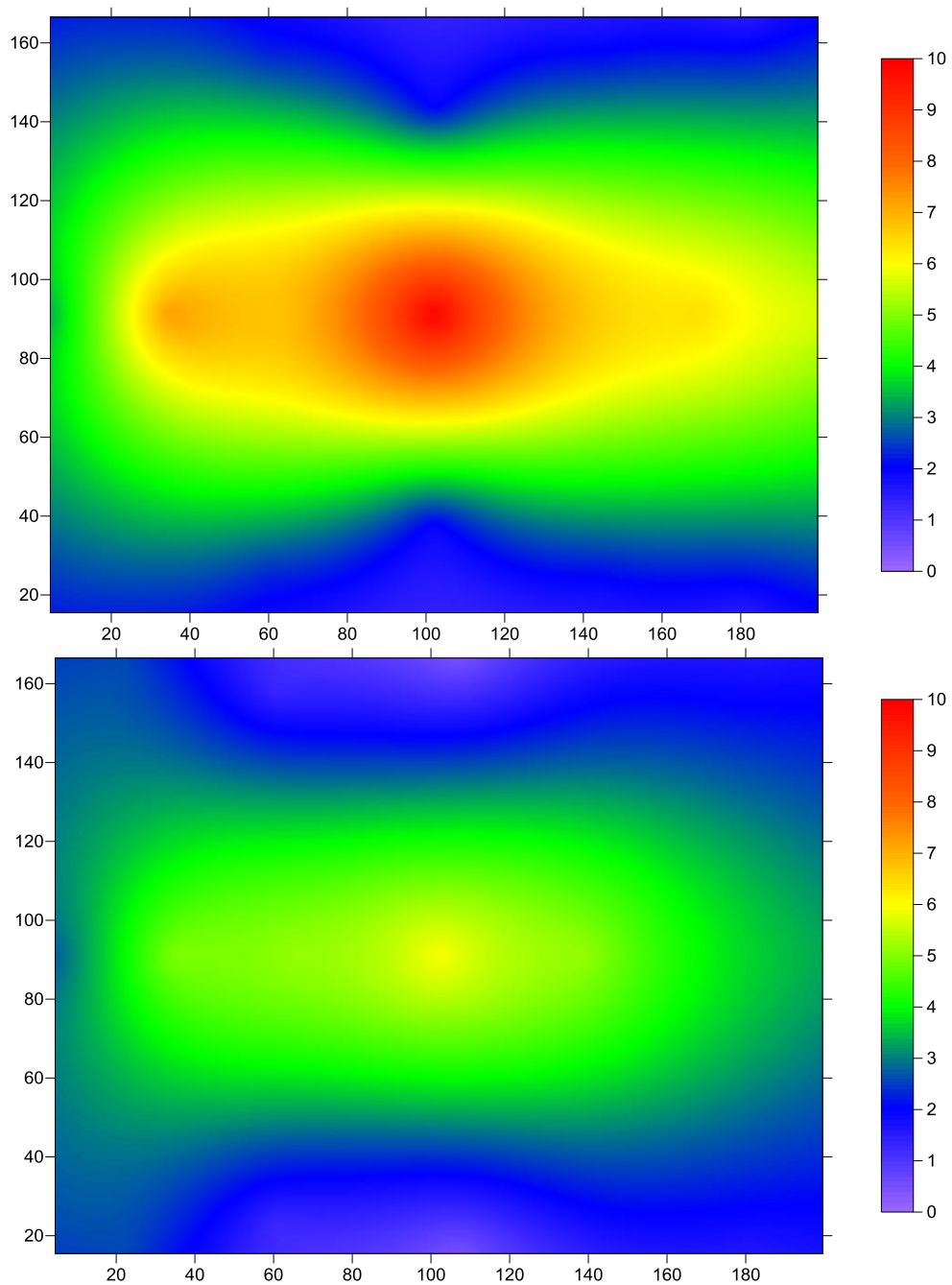
Assim como no caso à +20 °C, observa-se uma pequena melhora no desempenho térmico.

Figura 8.13 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – graxa térmica



O comportamento é semelhante ao observado no caso de +20 °C.

Figura 8.14 - Diferenças de temperatura Teste1/Teste2@45 °C/33.4 W – RTV566



Nota-se melhoramento do desempenho do RTV566, com as diferenças de temperatura reduzidas. O tempo de estocagem parece ser favorável ao aumento da condutância de contato.

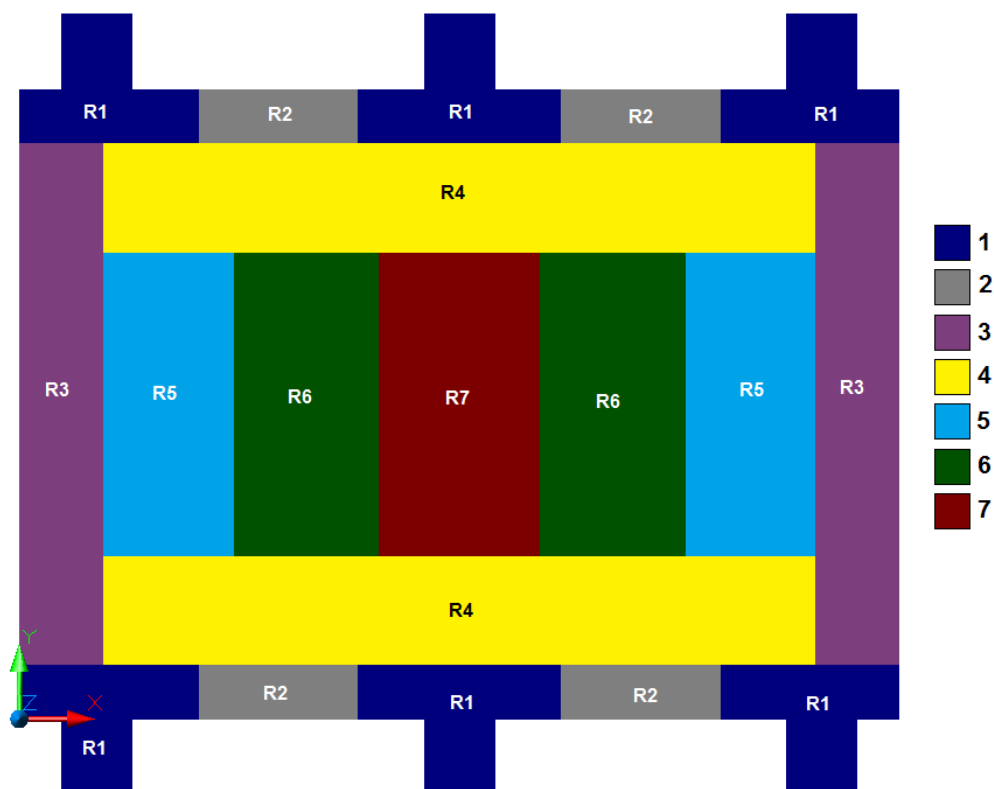
Resumindo, para o patamar de 45°C/33.4 W nota-se que do Teste 1 para o Teste 2 houve aumento nas  $\Delta T_s$  para a interface sem material, pouca alteração para eGraf, folha de índio e graxa térmica e redução nas  $\Delta T_s$  para RTV566.

,

### **8.3 Normalização da Carga Térmica Aplicada**

A resistência térmica de contato depende muito da pressão do contato. Baseando-se nisso, é possível dividir a interface em zonas típicas, seguindo as recomendações de Welch e Rutter (1989). Estas zonas serão assumidas para cálculo da média das diferenças de temperaturas  $\Delta T$  entre as superfícies em contato, possibilitando o levantamento de mapas com distribuição das RTC locais. As zonas são: R1 – região dos pés, R2 – região entre os pés, R3 – região extremidade, R4 – região entre os pés e o centro, R5 – região entre a extremidade e o centro, R6 – região próxima ao centro, R7 – região central, Figura 8.15.

Figura 8.15 – Diferentes zonas na interface baseadas nos sensores de temperatura



A Tabela 8.3 mostra a área de cada uma das zonas e a porcentagem da área total.

Tabela 8.3 – Área individual e porcentagem da área total de cada uma das zonas.

Região	Área da zona (m <sup>2</sup> )	Porcentagem da área total (%)
R1	0,0049	14
R2	0,0019	6
R3	0,0047	14
R4	0,0083	25
R5	0,0043	13
R6	0,0048	14
R7	0,0048	14
TOTAL	0,0335	100

A Tabela 8.4 apresenta a distribuição dos sensores de temperatura para cada uma das regiões consideradas.

Tabela 8.4 – Sensores correspondentes a cada região

Região	sem material	eGraf	folha de índio	graxa térmica	RTV566
R1	101-113	201-213	301-513	401-313	501-413
	102-114	202-214	302-514	402-314	502-414
	103-115	203-215	303-515	403-315	503-415
R2	104-116	204-216	304-516	404-316	504-416
	105-117	205-217	305-517	405-317	505-417
R3	107-119	207-219	307-519	407-319	507-419
	112-124	212-224	312-524	412-324	512-424
R4	106-118	206-218	306-518	406-318	506-418
R5	108-120	208-220	308-520	408-320	508-420
	111-123	211-223	311-523	411-323	511-423
R6	109-121	209-221	309-521	409-321	509-421
R7	110-122	210-222	310-522	410-322	510-422

Com os objetivos de acumular dados estatísticos e fazer uma comparação direta dos resultados obtidos no teste, utilizando as diferenças de temperatura dos sensores correspondentes, se fez uma normalização destas diferenças de temperatura baseada na diferença de potência aplicada em cada conjunto para cada fase. Todas as  $\Delta T$  foram multiplicadas por um fator de normalização obtido através da divisão da potência utilizada nas fases com alvo de temperatura +20 °C.

Dessa forma, é possível fazer a comparação de dados com cargas térmicas diferentes. Esta abordagem é baseada na suposição de que o valor de  $h$  não muda com a potência aplicada, ou seja, as equações  $q = h\Delta T$  e  $qf_1 = h\Delta Tf_2$  são iguais se o fator de normalização de potência  $f_1$  for igual ao fator de normalização de diferença de temperatura  $f_2$ . Assim, pode-se usar um fator de potência para normalizar as diferenças de temperatura, Equação 8.25.

$$f = \frac{q_i}{q_0} = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_0}, \quad (8.25)$$

onde o subscrito 0 corresponde ao caso básico escolhido: Q=24,6 W@+20 °C

A Tabela 8.5 mostra os fatores de normalização e a Tabela 8.6 apresenta os valores médios de diferença de temperatura normalizada para as regiões R1 a R7, medidas nos cinco conjuntos durante o Teste 1 (24 fases).

Tabela 8.5 – Fatores de normalização – Teste 1

Fase	Potência por <i>dummy</i> (W)	Fator de normalização
FASE 4 H1+H2+H3@-20	14,37	0,58
FASE 22 H1+H2+H3@-20°C	14,35	0,58
FASE 32 H1+H2+H3@-20°C	14,34	0,58
FASE 40 H1+H2+H3@-20°C	14,36	0,58
FASE 5 H1@-20	14,23	0,58
FASE 6 H3@-20	14,33	0,58
FASE 7 H1+H2+H3@0°C	19,69	0,80
FASE 21 H1+H2+H3@ 0°C	18,63	0,76
FASE 33 H1+H2+H3@ 0°C	18,60	0,75
FASE 39 H1+H2+H3@ 0°C	18,61	0,76
FASE 8 H1@0	18,67	0,76
FASE 9 H3@0	18,79	0,76
FASE 10 H1+H2+H3@+20°C	24,65	1,00
FASE 20 H1+H2+H3@+20°C	24,66	1,00
FASE 34 H1+H2+H3@+20°C	24,59	1,00
FASE 38 H1+H2+H3@+20°C	24,65	1,00
FASE 11 H1@+20	24,54	1,00
FASE 12 H3@+20	24,72	1,00
FASE 13 H1+H2+H3@+45 °C	33,37	1,35
FASE 19 H1+H2+H3@+45°C	33,33	1,35
FASE 35 H1+H2+H3@+45°C	33,34	1,35
FASE 37 H1+H2+H3@+45°C	33,35	1,35
FASE 14 H1@+45	33,24	1,35
FASE 15 H3@+45	33,48	1.36

Observa-se que a diferença de temperatura nas regiões R1 e R2 são baixas para todos os conjuntos, com exceção do conjunto sem material de interface, o que está de acordo com a teoria de contato, uma vez que as regiões R1 e R2 apresentam maior pressão de contato.

Tabela 8.6 – Média das diferenças de temperatura  $dT_i$  normalizadas, Teste 1

Conjunto	$\mu_{dT, R1}$ (°C)	$\mu_{dT, R2}$ (°C)	$\mu_{dT, R3}$ (°C)	$\mu_{dT, R4}$ (°C)	$\mu_{dT, R5}$ (°C)	$\mu_{dT, R6}$ (°C)	$\mu_{dT, R7}$ (°C)
sem material	22,8	35,3	33,6	47,3	50,0	49,0	46,0
eGraf	1,6	2,0	7,7	9,6	16,1	15,8	17,3
folha de índio	1,3	1,9	4,8	19,2	20,8	21,2	18,7
graxa térmica	1,4	1,3	1,4	2,6	3,4	1,4	3,3
RTV566	1,9	1,6	2,0	3,8	6,0	6,0	6,5

É interessante notar a grande diferença, entre o conjunto sem material e os demais, observada nas regiões de pressão maior R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub>. Isso confirma a grande importância do material de interface mesmo nas regiões de pressão elevada, uma vez que a  $\Delta T$  pode aumentar até 18 vezes se nenhum material for utilizado. Para as regiões com menor pressão, no centro, as interfaces com graxa térmica e RTV566 apresentaram  $\Delta T$ s acentuadamente menores. No geral a graxa térmica é o material de interface mais eficiente.

Observa-se que a diferença de temperatura nas regiões R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub> são baixas para todos os conjuntos, com exceção do conjunto sem material de interface. Porém, é possível notar que as diferenças de temperatura no conjunto com RTV566 estão mais pronunciadas.

O desvio padrão das médias de  $\Delta T_i$  medidas no Teste 1 é mostrado na Tabela 8.7.



Tabela 8.7 - Desvio padrão da média das diferenças de temperatura  $dT_i$  normalizadas, Teste 1

Conjunto	$\sigma_{dT, R1}$ (°C)	$\sigma_{dT, R2}$ (°C)	$\sigma_{dT, R3}$ (°C)	$\sigma_{dT, R4}$ (°C)	$\sigma_{dT, R5}$ (°C)	$\sigma_{dT, R6}$ (°C)	$\sigma_{dT, R7}$ (°C)
sem material	6,5	7,1	9,7	6,4	6,2	7,9	9,1
eGraf	0,2	0,4	1,4	2,1	1,6	2,3	2,3
folha de índio	0,5	0,6	1,7	2,6	1,8	2,9	3,0
graxa térmica	0,2	0,2	0,5	0,8	1,0	0,7	1,3
RTV566	0,7	0,3	0,4	0,5	0,7	1,3	2,0

A Tabela 8.8 mostra os fatores de normalização e a Tabela 8.9 apresenta os valores médios de diferença de temperatura normalizada para as regiões R1 a R7, medidas nos cinco conjuntos durante o Teste 2 (27 fases).

Tabela 8.8 - Fatores de normalização – Teste 2

Fase	Potência por <i>dummy</i> (W)	Fator de normalização
FASE 19 H1+H2+H3@-20°C	14,23	0,58
FASE 25 H1+H2+H3@-20°C	14,29	0,58
FASE 20 H1@-20°C	14,19	0,58
FASE 21 H3@-20°C	14,28	0,58
FASE 26 H1@-20°C	14,18	0,58
FASE 27 H3@-20°C	14,29	0,58
FASE 16 H1+H2+H3@ 0°C	18,50	0,76
FASE 28 H1+H2+H3@ 0°C	18,62	0,76
FASE 17 H1@ 0°C	18,63	0,76
FASE 18 H3@ 0°C	18,77	0,76
FASE 29 H1@ 0°C	18,62	0,76
FASE 30 H3@ 0°C	18,77	0,76
FASE 01 H1+H2+H3@+20°C	24,59	1,00
FASE 13 H1+H2+H3@+20°C	24,52	1,00
FASE 31 H1+H2+H3@ +20°C	24,68	1,00
FASE 02 H1@+20°C	24,48	1,00
FASE 03 H3@+20°C	24,65	1,00
FASE 14 H1@+20°C	24,46	1,00
FASE 15 H3@+20°C	24,67	1,00
FASE 32 H1@ +20°C	24,49	1,00
FASE 33 H3@ +20°C	24,68	1,00
FASE 04 H1+H2+H3@+45°C	33,40	1,35

continua

Tabela 8.8 - Conclusão

FASE 10 H1+H2+H3@+45°C	33,10	1,35
FASE 05 H1 @+45°C	33,22	1,35
FASE 06 H3@+45°C	33,42	1,35
FASE 11 H1@+45°C	33,18	1,35
FASE 12 H3@+45°C	33,40	1,35

Tabela 8.9 - Média das diferenças de temperatura  $dT_i$  normalizadas, Teste 2

Conjunto	$\mu_{dT, R1}$ (°C)	$\mu_{dT, R2}$ (°C)	$\mu_{dT, R3}$ (°C)	$\mu_{dT, R4}$ (°C)	$\mu_{dT, R5}$ (°C)	$\mu_{dT, R6}$ (°C)	$\mu_{dT, R7}$ (°C)
sem material	30,7	43,3	- *	56,4	58,5	56,3	55,1
eGraf	1,8	1,9	6,2	9,9	16,8	15,3	15,8
folha de índio	2,1	1,9	4,0	21,7	23,4	21,7	19,6
graxa térmica	0,9	1,0	2,1	3,6	4,3	1,7	3,4
RTV566	1,8	2,0	1,9	4,2	6,7	6,4	5,2

\*ocorreu uma falha na aquisição do sensor TM118 durante o teste

Novamente é possível notar a grande diferença entre o conjunto sem material e os demais na zona  $R_1$ . Também, a tendência se repete depois da estocagem nas regiões com menor pressão, e a diferença continua sendo bastante grande para as interfaces com graxa térmica e RTV566, quando comparadas com as demais.

Tabela 8.10 – Desvio padrão da média das diferenças de temperatura  $dT_i$  normalizadas, Teste 2

Conjunto	$\sigma_{dT, R1}$ (°C)	$\sigma_{dT, R2}$ (°C)	$\sigma_{dT, R3}$ (°C)	$\sigma_{dT, R4}$ (°C)	$\sigma_{dT, R5}$ (°C)	$\sigma_{dT, R6}$ (°C)	$\sigma_{dT, R7}$ (°C)
sem material	3,2	4,0	- *	3,1	3,5	6,9	4,3
eGraf	0,2	0,3	2,7	2,5	1,8	3,0	2,4
folha de índio	0,7	0,1	0,3	2,1	2,3	3,9	2,6
graxa térmica	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,9
RTV566	0,6	0,5	0,5	0,5	0,8	1,4	0,5

\*ocorreu uma falha na aquisição do sensor TM118 durante o teste

Para facilitar a comparação entre o Teste 1 e o Teste 2, executado 6 meses depois, a Tabela 8.11 mostra as mudanças nas diferenças de temperatura e

sua variação percentual. Valores positivos mostram que a diferença aumentou (pior desempenho térmico) e valores negativos mostram que a diferença diminuiu (melhor desempenho térmico).

Tabela 8.11 – Variação das diferenças de temperatura do Teste 1 para o Teste 2

<b>Conjunto</b>	$\mu_{dT, R1}$	$\mu_{dT, R2}$	$\mu_{dT, R3}$	$\mu_{dT, R4}$	$\mu_{dT, R5}$	$\mu_{dT, R6}$	$\mu_{dT, R7}$
sem material	+35%	+22%	- *	+19%	+17%	+15%	+20%
eGraf	+7%	-7%	-20%	+3%	+4%	-3%	-8%
folha de índio	+59%	-2%	-24%	+13%	+12%	+2%	+5%
graxa térmica	-35%	+26%	+52%	+41%	+25%	+25%	+3%
RTV566	-4%	+29%	-7%	+10%	+12%	+8%	-22%

\*ocorreu uma falha na aquisição do sensor TM118 durante o teste

Para deixar a comparação mais direta e clara entre as interfaces, calculou-se a média ponderada na área de cada região da variação das diferenças de temperatura do Teste 1 para o Teste 2.

Tabela 8.12 – Média ponderada das diferenças de temperatura do Teste 1 para o Teste 2

<b>Conjunto</b>	<b>Média ponderada na área</b>
sem material	+16%
eGraf	-5%
folha de índio	+7%
graxa térmica	+21%
RTV566	-2%

Comparando os resultados do Teste 1 e Teste 2, depois de estocagem de seis meses, é possível observar que os conjuntos sem material e com graxa térmica tiveram aumento significativo nas diferenças de temperatura, enquanto o com folha de índio teve um aumento discreto. Por outro lado, os conjuntos com os materiais eGraf e RTV566 apresentaram uma leve queda no valor global das diferenças de temperatura entre o dummy e o painel.

A degradação do contato com tempo para graxa pode ser explicada pelo efeito de secagem da graxa, com a separação dos componentes sólidos e líquidos,

mesmo com graxa qualificada, existe uma taxa de degasagem, muito pequena. No caso da interface sem material, pode haver a formação de microcamadas de óxido nas microcavidades de superfície de contato, o qual tem condutividade térmica baixa e reduz a HTC do contato global.

Porém, apesar da eficiência da graxa térmica ter reduzido, o valor médio de aumento de  $\Delta T$  é menor que 1 °C, o que não é significativo.

#### 8.4 Razão das Diferenças Extremas de Temperatura $\Delta T_i$ – Indicador 1 ( $\zeta_1$ )

Para avaliar e comparar a qualidade de contato térmico na interface plana ao longo de área de interface pode-se introduzir um critério, ou indicador, a partir de temperaturas locais medidas em diferentes pontos da interface. Para caracterizar a interface da melhor maneira possível, é coerente escolher um ponto de melhor contato, onde a diferença de temperatura é mínima, normalmente nas regiões de pés ( $\Delta T_{min}$ ), e um ponto de contato pior, onde a diferença de temperatura entre as superfícies em contato é máxima, normalmente no centro de equipamento ( $\Delta T_{max}$ ). A razão entre estas diferenças de temperatura mostra a homogeneidade do contato. No caso ideal, onde a  $\Delta T$  é a mesma para toda a área da interface, esta razão é igual a um.

Para facilitar a comparação entre os diferentes materiais de interface, levando em consideração as diferenças de temperatura entre o sensor do *dummy* e o sensor do painel,  $\Delta T_i$ , em pontos de melhor e pior contato, foram levantadas as diferenças máximas e mínimas para o mesmo conjunto, revelando assim esta variação. Assim, é possível revelar um indicador que é inerente de cada material de interface, aqui chamado de Indicador 1 ( $\zeta_1$ ), calculado a partir da Equação 8.26.

$$\zeta_1 = \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}} \quad (8.26)$$

Em um caso de interface ideal, o valor do indicador seria igual a um. Quanto maior o valor de  $\zeta_1$ , menos homogêneo é o contato ao longo da área da interface, revelando os problemas de contato na parte central do equipamento. O indicador não depende muito do fluxo de calor, uma vez que  $\Delta T_{\max}$  e  $\Delta T_{\min}$  variam na mesma proporção.

A Tabela 8.13 apresenta os valores médios para o Teste 1 das diferenças de temperaturas máximas e mínimas ao longo da interface de cada conjunto, assim como o cálculo da média do Indicador, considerando todos as fases do Teste 1.

Tabela 8.13 – Médias das diferenças máximas, mínimas, Indicador 1 ( $\zeta_1$ ) e desvio padrão  $\sigma_{\zeta_1}$ , Teste 1

Conjunto	$\mu_{dT_{\max}}$ (°C)	$\mu_{dT_{\min}}$ (°C)	$\mu_{\zeta_1}$	$\sigma_{\zeta_1}$
sem material	43,1 ± 26,3	20,6 ± 15,1	2,4	0,4
eGraf	16,7 ± 8,7	1,5 ± 0,7	11,4	1,2
folha de índio	23,1 ± 11,4	1,4 ± 1,1	18,8	8,1
graxa térmica	3,7 ± 2,1	0,9 ± 0,6	3,7	0,8
RTV566	6,8 ± 4,3	1,3 ± 0,7	5,1	0,5

As incertezas para os valores médios de  $\Delta T_{\max}$  e  $\Delta T_{\min}$  são altas porque consideram diferentes patamares de temperatura.

É possível notar que a interface sem material apresenta menor gradiente nas diferenças de temperatura. Isso pode ser explicado porque nesta região dos pés o contato já é ruim, assim como no centro. Portanto, apesar do gradiente ser pequeno, o contato no geral é baixo.

Do ponto de vista comparativo, é mais adequado usar este indicador para medir a qualidade de distribuição do contato ao longo da área nos casos quando um material de interface existe. Assim, é possível observar, no Teste 1, que a interface com folha de índio apresenta a maior variação e a graxa a menor. Isso pode ser explicado porque a graxa é fluída e preenche maior parte do volume da interface. Já a folha de índio é menos maleável e de espessura

fixa, o que pode causar o não preenchimento de boa parte do volume na região central e causar falta de contato.

Os baixos valores de desvio padrão revelam que este indicador depende pouco do nível de temperatura, uma vez que os valores apresentam as médias de todas as fases (níveis de temperatura) do Teste 1.

A Tabela 8.14 apresenta os valores médios para o Teste 2 das diferenças de temperaturas máximas e mínimas ao longo da interface de cada conjunto, assim como o cálculo da média do Indicador  $\zeta_1$ , considerando todas as fases do Teste 2.

Tabela 8.14 - Médias das diferenças máximas, mínimas, Indicador 1 ( $\zeta_1$ ), Teste 2

Conjunto	$\mu_{dT_{max}}$ (°C)	$\mu_{dT_{min}}$ (°C)	$\mu_{\zeta_1}$	$\sigma_{\zeta_1}$
sem material	55,4 ± 26,4	27,8 ± 11,1	2,0	0,1
eGraf	16,8 ± 7,0	1,5 ± 0,7	11,2	1,3
folha de índio	21,9 ± 10,9	1,6 ± 0,7	13,3	2,0
graxa térmica	4,5 ± 2,5	1,0 ± 1,0	5,1	1,2
RTV566	7,2 ± 3,7	1,7 ± 1,1	4,6	1,8

As incertezas para os valores médios de  $\Delta T_{max}$  e  $\Delta T_{min}$  são altas porque consideram diferentes patamares de temperatura.

Da mesma forma, a interface sem material apresenta a menor variação de  $\Delta T$  ao longo da interface. Dentre os materiais, a interface com RTV566 apresenta menor variação de  $\Delta T$  e a folha de índio continua a maior.

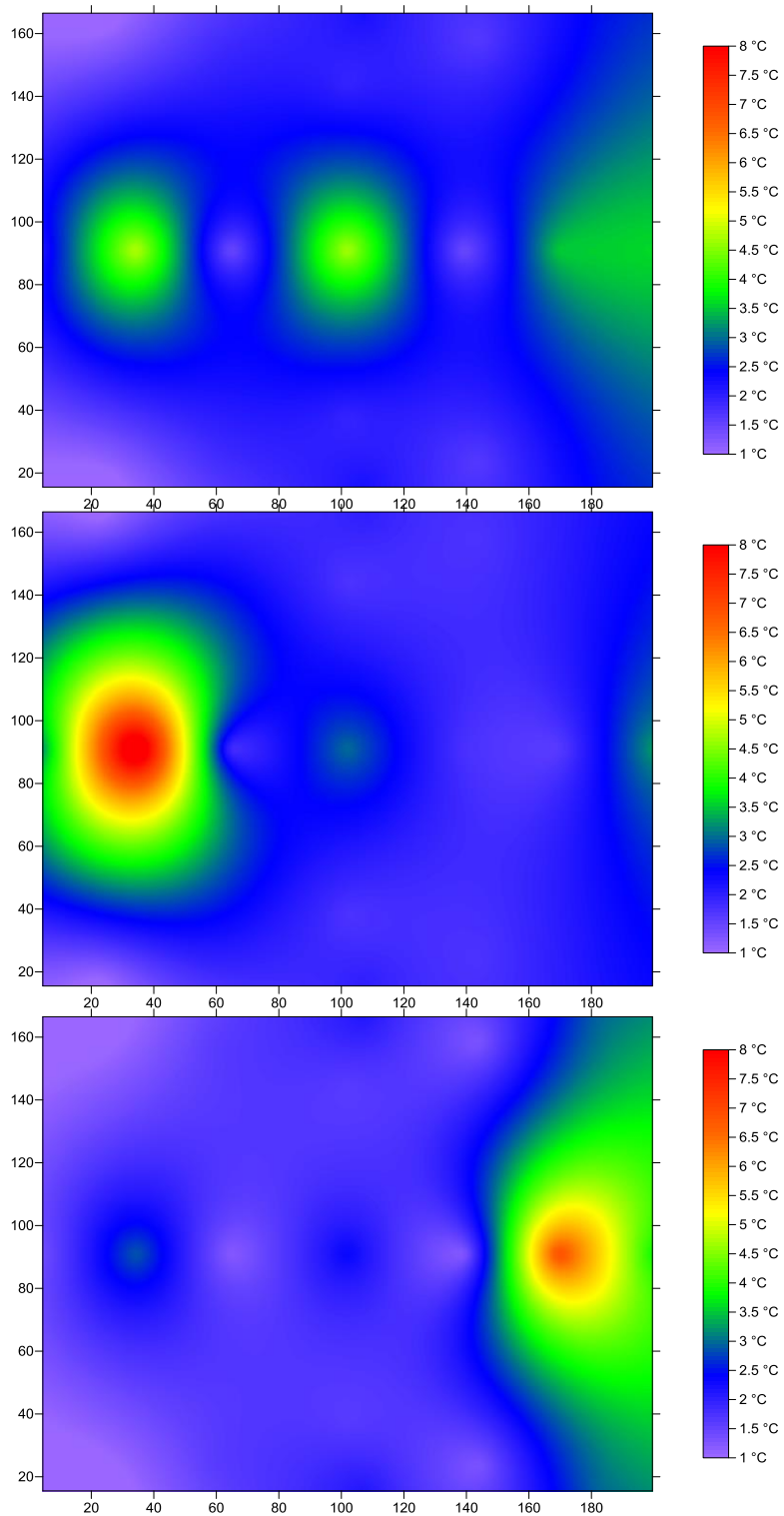
Comparando os resultados do Teste 1 e do Teste 2, nota-se que a tendência de variação é semelhante. É possível notar que a interface com folha de índio ainda apresenta maior variação de  $\Delta T$  ao longo da interface e o RTV566 apresenta a menor variação, devido ao aumento na variação ao longo da interface com graxa térmica, o que sugere algum tipo de degradação de desempenho.

## **8.5 Variação nas Diferenças de Temperatura $\Delta T_i$ com Não Homogeneidade da Carga Aplicada – Indicador 2 ( $\zeta_2$ )**

Em equipamentos eletrônicos reais de satélites, é comum que se haja concentração da dissipação em alguma região da caixa. Isso pode causar aquecimento local e elevar de forma indesejável a temperatura dos componentes eletrônicos. Quando se escolhe um material para utilizar na interface, este parâmetro também pode ser levado em conta.

Para revelar a variação de diferenças de temperatura com a aplicação da mesma potência de forma não-homogênea, a Figura 8.16 mostra o mapa de  $\Delta T_i$  para as fases 13, 14 e 15 do Teste 1, todas com potência total de 33,3 W aplicadas nos aquecedores H1+H2+H3, H1 e H3, respectivamente.

Figura 8.16 – dTs, Teste 1, graxa térmica, Fases 13, 14, 15 (33,3 W), respectivamente





É possível notar que nas fases em que a potência está concentrada em  $H_1$  ou  $H_3$ , a diferença de temperatura é maior na região dos aquecedores. Neste caso, as médias das zonas não são utilizadas para não mascarar o efeito.

A fim de quantificar o impacto da dissipação de calor não-homogênea, dependendo do material utilizado, foi criado um outro indicador, chamado de Indicador 2 ( $\zeta_2$ ), o qual pode ser utilizado pelo projetista térmico no ato de especificação do material de interface. Tal indicador é calculado baseado na diferença da máxima diferença de temperatura na interface quando uma mesma potência é dissipada de forma concentrada ou de forma homogênea, conforme a Equação 8.27.

$$\zeta_2 = \frac{\Delta T_{max,H_1}}{\Delta T_{max,H_1+H_2+H_3}} \quad ou \quad \zeta_2 = \frac{\Delta T_{max,H_3}}{\Delta T_{max,H_1+H_2+H_3}} \quad (8.27)$$

Quando a dissipação é homogênea, este indicador tem seu valor de um, ao passo que quando a dissipação é não-homogênea e surgem alterações nos diferenciais de temperaturas ao longo da área de contato, este indicador é maior de um.

A Tabela 8.15 apresenta os valores de  $\zeta_2$  calculados para todas as cinco interfaces, em função da potência aplicada e suas médias, para as fases do Teste 1.

Tabela 8.15 – Indicador 2 ( $\zeta_2$ ) - Teste 1

Conjunto	$\zeta_2$ (-20 °C)	$\zeta_2$ (0 °C)	$\zeta_2$ (+20 °C)	$\zeta_2$ (+45 °C)	$\mu_{\zeta_2}$	$\sigma_{\zeta_2}$
sem material	1,06	1,08	1,01	1,00	1,04	0,04
eGraf	1,32	1,25	1,21	1,21	1,25	0,04
folha de índio	1,08	1,26	1,27	1,36	1,24	0,10
graxa térmica	1,69	1,33	1,30	1,46	1,44	0,15
RTV566	1,21	1,29	1,31	1,34	1,29	0,05

Nota-se que para todas as interfaces, com a concentração da potência aplicada ( $W/m^2$ ), há um aumento diferença de temperatura máxima observada na interface. É interessante observar que se esperavam valores maiores para este indicador uma vez que a densidade de potência aplicada nos casos  $H_1$  ou  $H_3$  é três vezes maior do que para caso  $H_1+H_2+H_3$ . Entretanto, os aquecedores  $H_1$  e  $H_3$  estão instalados em regiões onde o contato na interface é melhor, o que acaba amenizando o efeito de concentração de temperatura. A alta condutividade térmica do *footprint* do *dummy* contribui na homogenização do fluxo de calor para o painel.

A Tabela 8.16 apresenta os valores de  $\zeta_2$  calculados para todas as cinco interfaces, em função da potência aplicada e suas médias, para as fases do Teste 2.

Tabela 8.16 – Indicador 2 ( $\zeta_2$ ) - Teste 2

Conjunto	$\zeta_2$ (-20 °C)	$\zeta_2$ (0 °C)	$\zeta_2$ (+20°C)	$\zeta_2$ (+45°C)	$\mu_{\zeta_2}$	$\sigma_{\zeta_2}$
sem material	1,18	1,22	1,23	1,24	1,22	0,02
eGraf	1,32	1,29	1,21	1,26	1,27	0,04
folha de índio	1,26	1,30	1,19	1,38	1,28	0,07
graxa térmica	1,24	1,25	1,25	1,51	1,31	0,11
RTV566	1,26	1,46	1,43	1,34	1,37	0,08

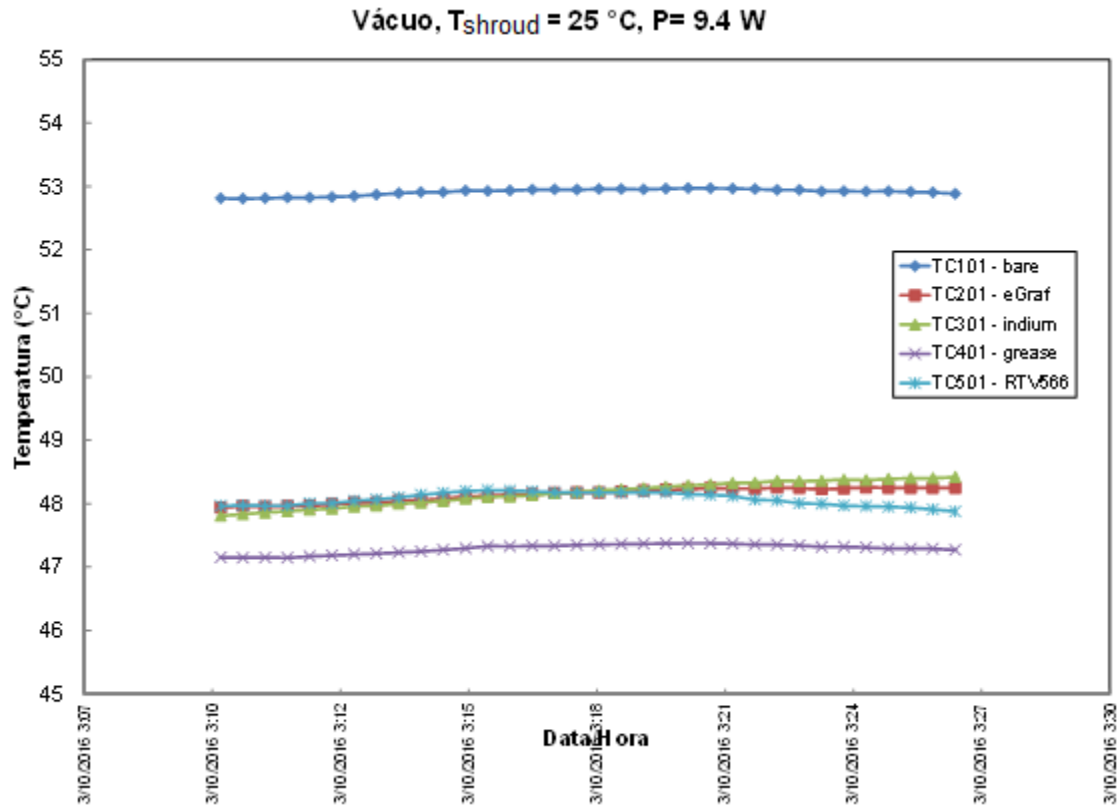
Para o teste realizado após os seis meses de estoque, a tendência se repete.

## 8.6 Comparativo entre Vácuo e Pressão Atmosférica ( $P_{amb}$ )

Com o objetivo de verificar e confirmar a importância do uso dos materiais de interface térmica em vácuo fez-se um comparativo com as condições de contorno aproximadas, com mesma temperatura externa e mesma potência aplicada, em vácuo e em pressão atmosférica.

A Figura 8.17 mostra a aquisição de temperatura dos termopares instalados nos TRPs dos cinco conjuntos, em vácuo, com temperatura da camisa as CVT controlada em 25 °C.

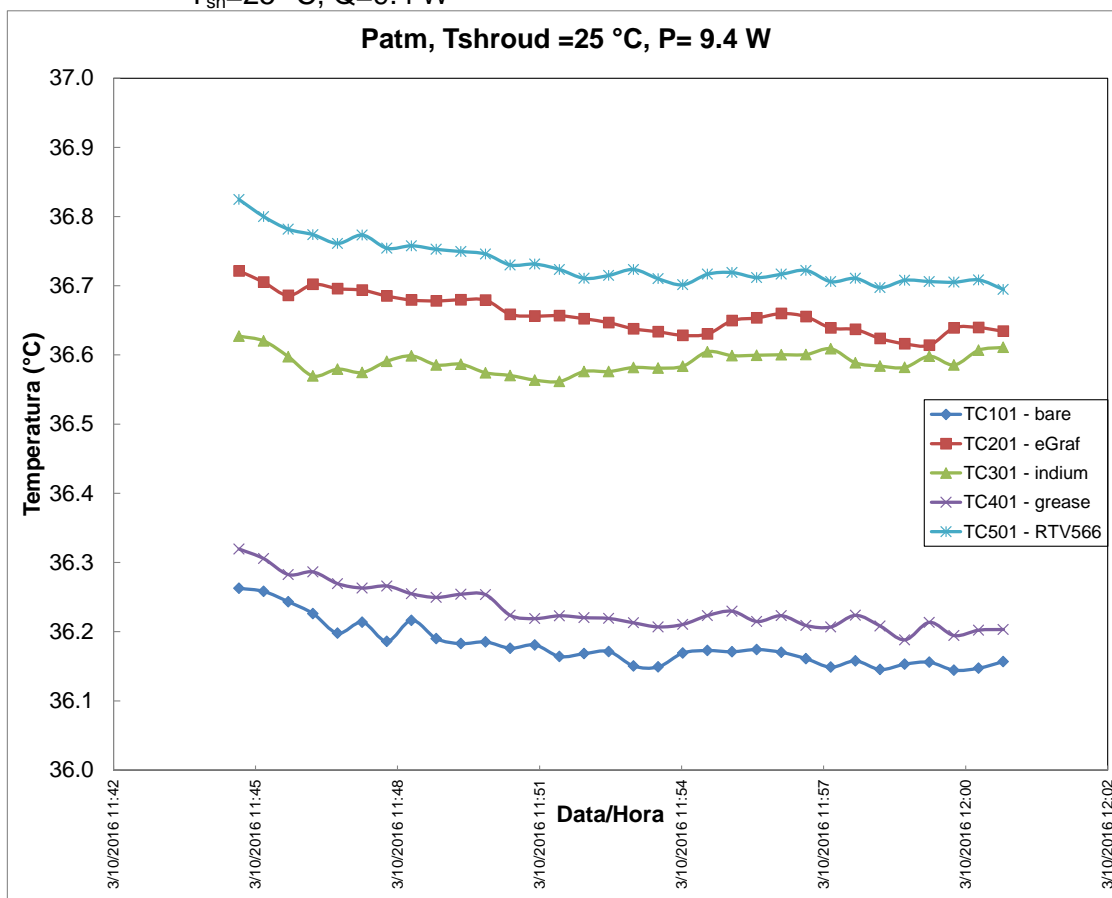
Figura 8.17 - Temperaturas nos TRPs das cinco interfaces em vácuo,  $T_{sh}=25\text{ °C}$ ,  $Q=9.4\text{ W}$



Em vácuo, é bastante claro que a interface sem material tem um desempenho térmico muito pior do que as demais para a mesma potência. Todas as outras interfaces apresentam comportamento semelhante.

A Figura 8.17 mostra a aquisição de temperatura dos todos conjuntos, em pressão de ambiente em escala de temperatura muito fina ( $\Delta T = 1\text{ °C}$ ).

Figura 8.18 – Temperaturas nos TRPs das cinco interfaces em pressão atmosférica,  $T_{sh}=25\text{ °C}$ ,  $Q=9.4\text{ W}$



É possível notar claramente que quando as interfaces estão em pressão atmosférica, o desempenho das cinco interfaces é semelhante, não apresentando diferenças maiores de  $1\text{ °C}$ . Ainda, devido às trocas de calor por convecção e desempenho ruim da isolação (MLI) em ambiente pressurizado com ar, as temperaturas ficam todas mais baixas do que em vácuo para a mesma potência.

Por outro lado, as diferenças de temperatura  $\Delta T_i$ , entre o *dummy* e o painel, em vácuo, podem chegar a valores até 15 vezes maiores quando comparadas com  $\Delta T_i$  a pressão ambiente. Novamente, isso confirma que a eficiência na transferência de calor à pressão ambiente é bem maior. Isso é exatamente o que ocorre nos testes de bancada em laboratório, o que pode dar uma impressão errada e não conservadora sobre as temperaturas de operação do

equipamento eletrônico durante estes testes, podendo causar aquecimento inaceitável nos mesmos quando em vácuo.

A Tabela 8.17 mostra a média das diferenças de temperatura em vácuo e pressão ambiente para uma mesma potência dissipada e condições de contorno equivalentes.

Tabela 8.17 – Média das diferenças de temperatura em vácuo e  $P_{amb}$  para mesma potência aplicada

<b>Conjunto</b>	<b><math>\mu (dT_{i,vacu0}-dT_{i,Pamb})</math> (°C)</b>
sem material	+12,8
eGraf	+2,8
folha de índio	+4,4
graxa térmica	+0,2
RTV566	+0,8

É possível notar uma grande diferença de temperatura mesmo para o caso de potência baixa de 9,4 W, o que confirma mais uma vez que um teste realizado em laboratório, a pressão ambiente, não é termicamente representativo do comportamento em vácuo.

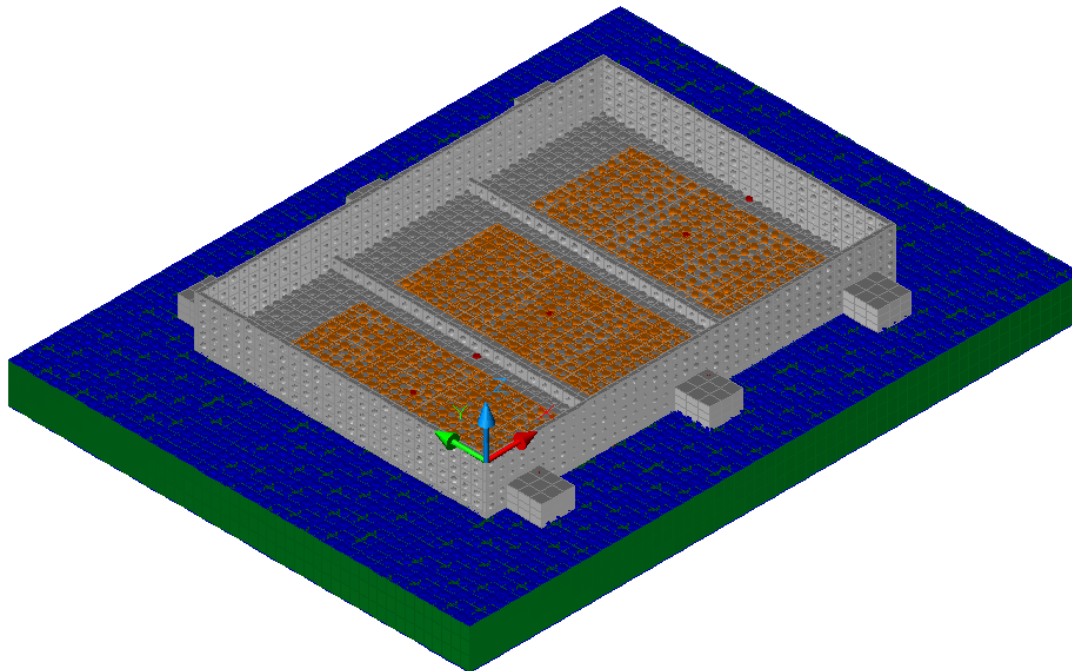


## 9 LEVANTAMENTO DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS DE CONTATO AO LONGO DAS INTERFACES

### 9.1 TMM Detalhado da Interface e Conjunto Experimental

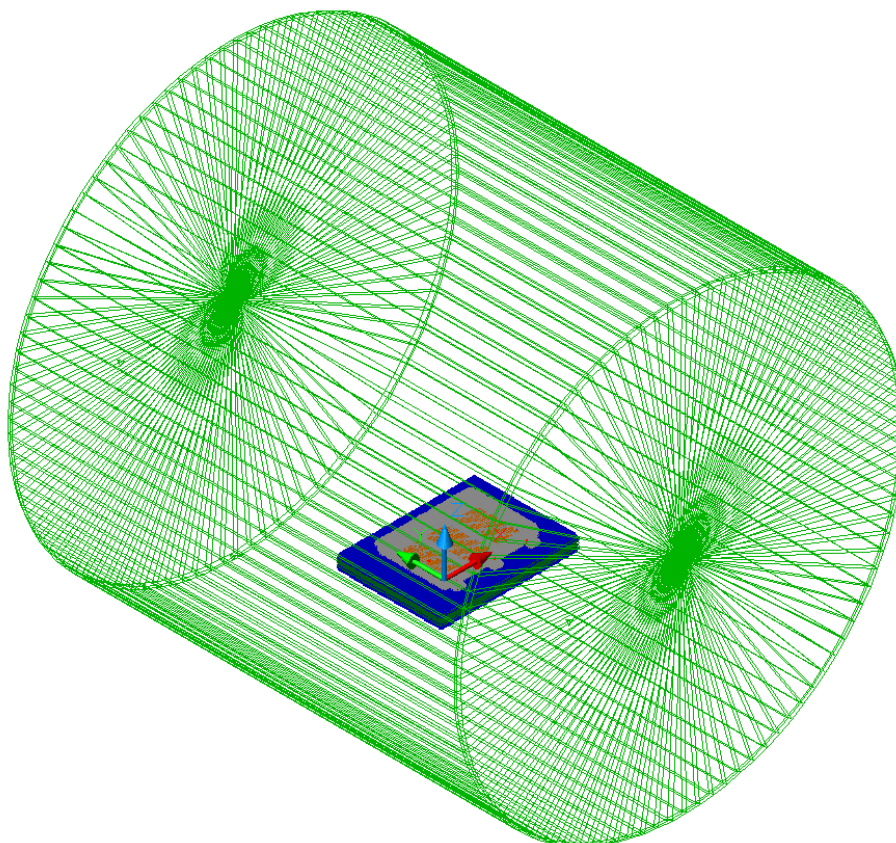
Com o uso do software Thermal Desktop SINDA/Fluint, um TMM detalhado foi desenvolvido a fim de representar termicamente um conjunto composto por *dummy* e painel de forma detalhada, com as condições de contorno realizadas no teste. O modelo é composto por *dummy* de alumínio, aquecedores, *facesheet* interno, *honeycomb*, *facesheet* externo (radiador), material de interface (dividido em 7 tipos de zonas, baseadas nos sensores de temperatura do teste), sensores de temperatura, fios dos sensores de temperatura e *shroud* da CVT. A Figura 9.1 mostra o conjunto *dummy*-painel.

Figura 9.1 - Ilustração geral do TMM detalhado



A Figura 9.2 mostra o modelo de um conjunto *dummy*-painel dentro da CVT 1x1 m do LIT. O shroud da câmara foi construído de maneira simplificada com uma superfície cilíndrica e duas superfícies em formato de disco, ambas com nós do tipo *boundary nodes* com temperatura fixa (aquisição dos testes).

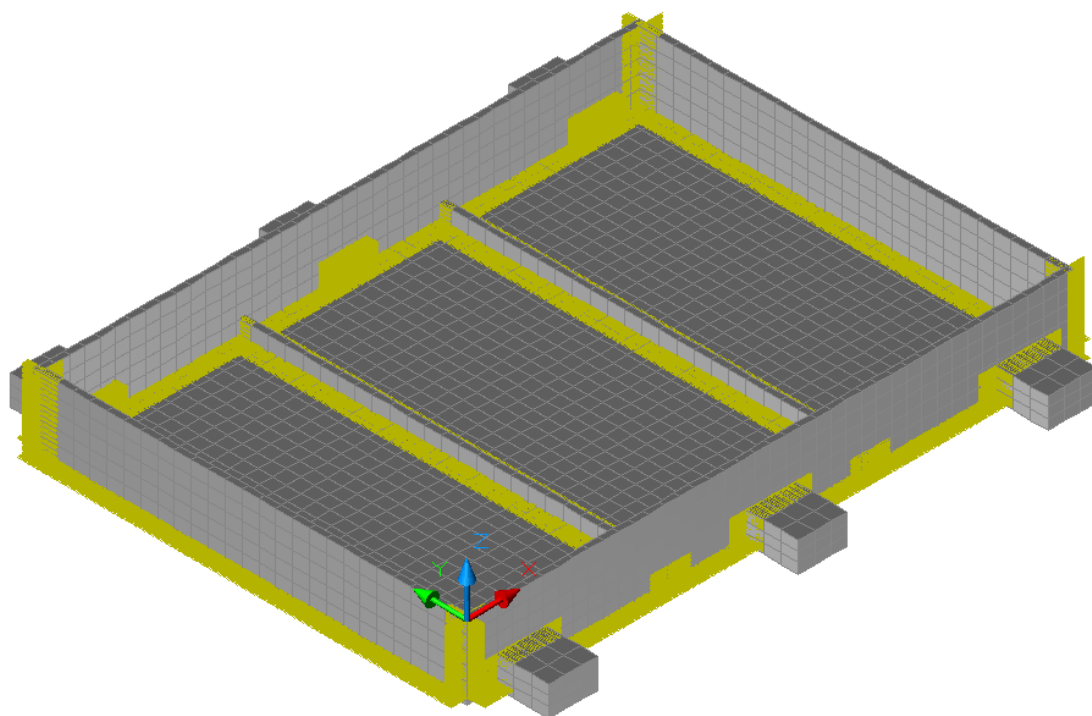
Figura 9.2 – Conjunto *dummy*-painel dentro da CVT 1x1 m



O *dummy* do equipamento foi construído com 13 elementos sólidos (*FD solid*), aos quais foi atribuído contato com valor alto ( $50.000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), uma vez que a peça real é de alumínio 5052 usinado. A representação do contato entre as peças é ilustrada na Figura 9.3.

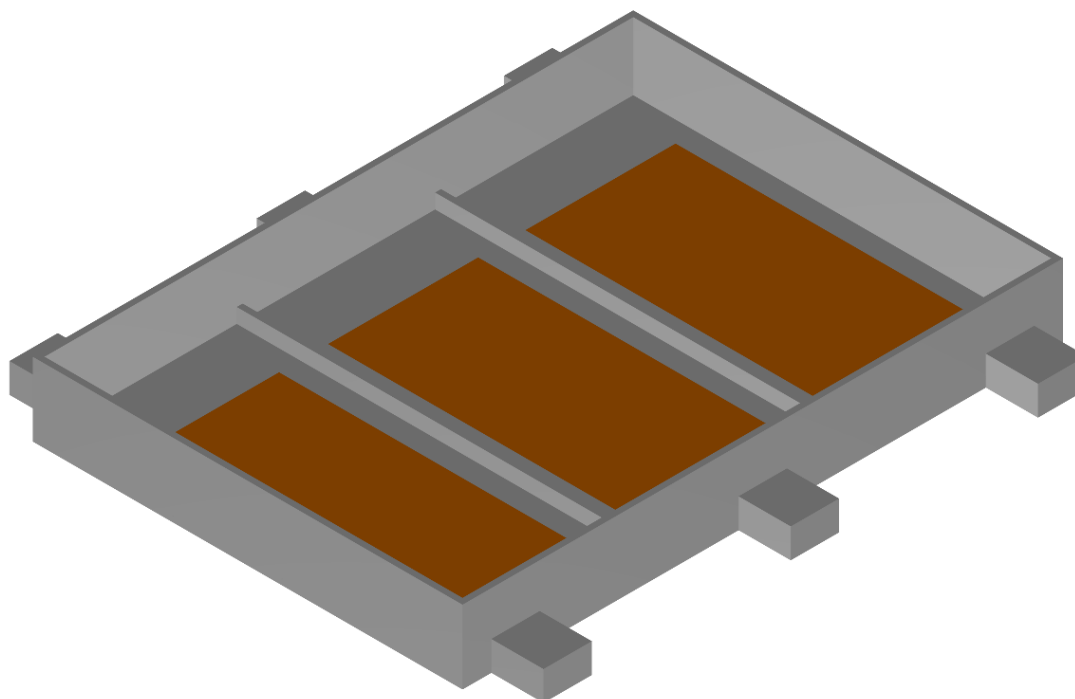


Figura 9.3 - Partes do *dummy* com bom contato térmico



Os aquecedores foram construídos com o uso de superfícies retangulares com carga térmica aplicada individualmente, do tipo *heat load* e contato térmico com o *dummy*, Figura 9.4.

Figura 9.4 - Representação dos aquecedores através de superfícies



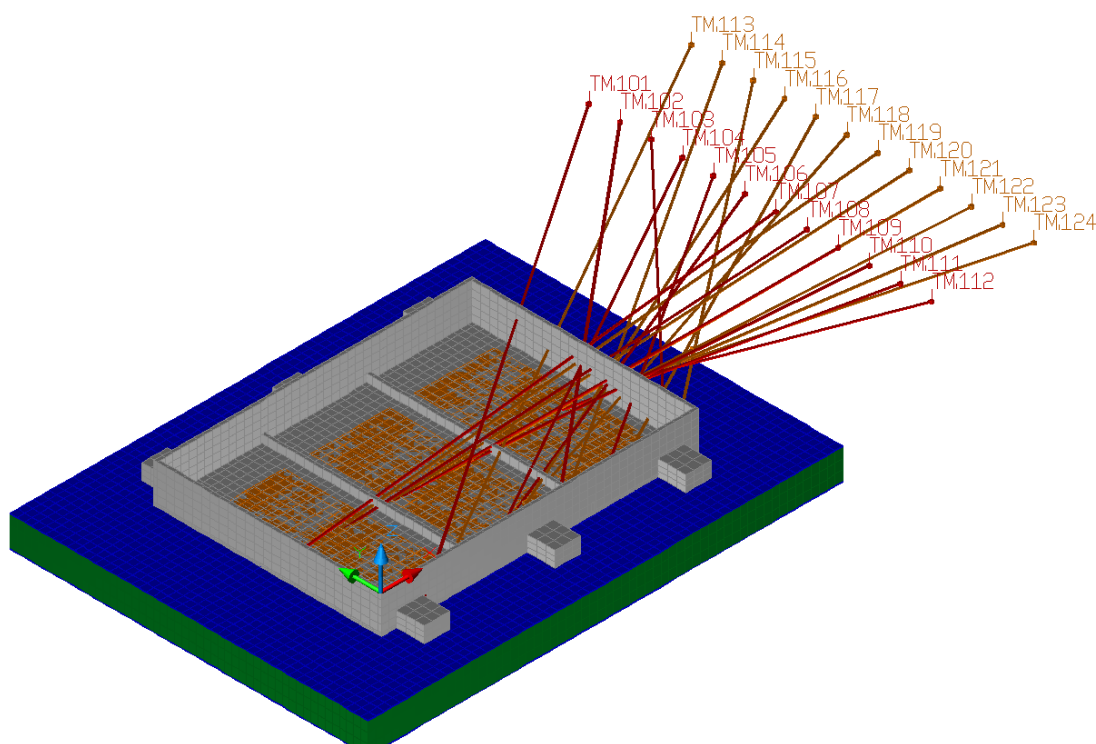
A Tabela 9.1 mostra um resumo dos principais submodelos que compõe o TMM e seus respectivos números de nós.

Tabela 9.1 – Principais submodelos e número de nós do TMM

Submodelo	Descrição	Número de nós
DUMMY	dummy de alumínio	3562
FACE	facesheet interno	2998
FACE_RAD	facesheet radiador	2999
HEATERS	aquecedores	510
HONEY	estrutura de honeycomb (core)	9000
INTERF_1	superfície interface - zona 1	276
INTERF_2	superfície interface - zona 2	96
INTERF_3	superfície interface - zona 3	200
INTERF_4	superfície interface - zona 4	296
INTERF_5	superfície interface - zona 5	238
INTERF_6	superfície interface - zona 6	238
INTERF_7	superfície interface - zona 7	238
TM	termistores	24
TVC	shroud da CVT 1x1 m do LIT	3

Para facilitar a extração dos dados de temperatura dos nós correspondentes às posições dos sensores de temperatura do teste, um submodelo foi criado para os sensores. Cada sensor é representado por um nó sem capacidade térmica (*arithmetic node*) conectado através de um condutor com o nó correspondente. A Figura 9.5 mostra os condutores ligando os nós dos sensores no TMM.

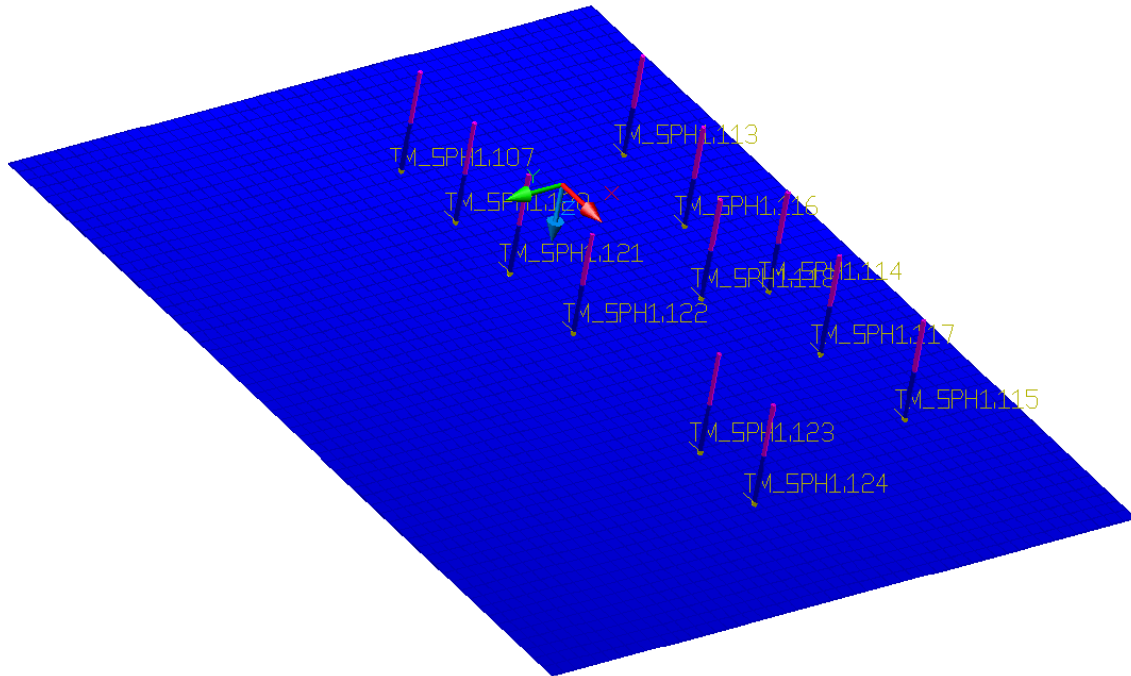
Figura 9.5 - Sensores de temperatura no TMM



Um estudo foi realizado a fim de entender a influência da fiação dos sensores instalados no painel, uma vez que ela atua como uma aleta radiativa, retirando calor do sensor e causando uma diminuição indesejada da temperatura de leitura, de até 0,4 °C quando a superfície de interesse está em +55 °C, de acordo com o resumo do estudo apresentado no APENDICE B.

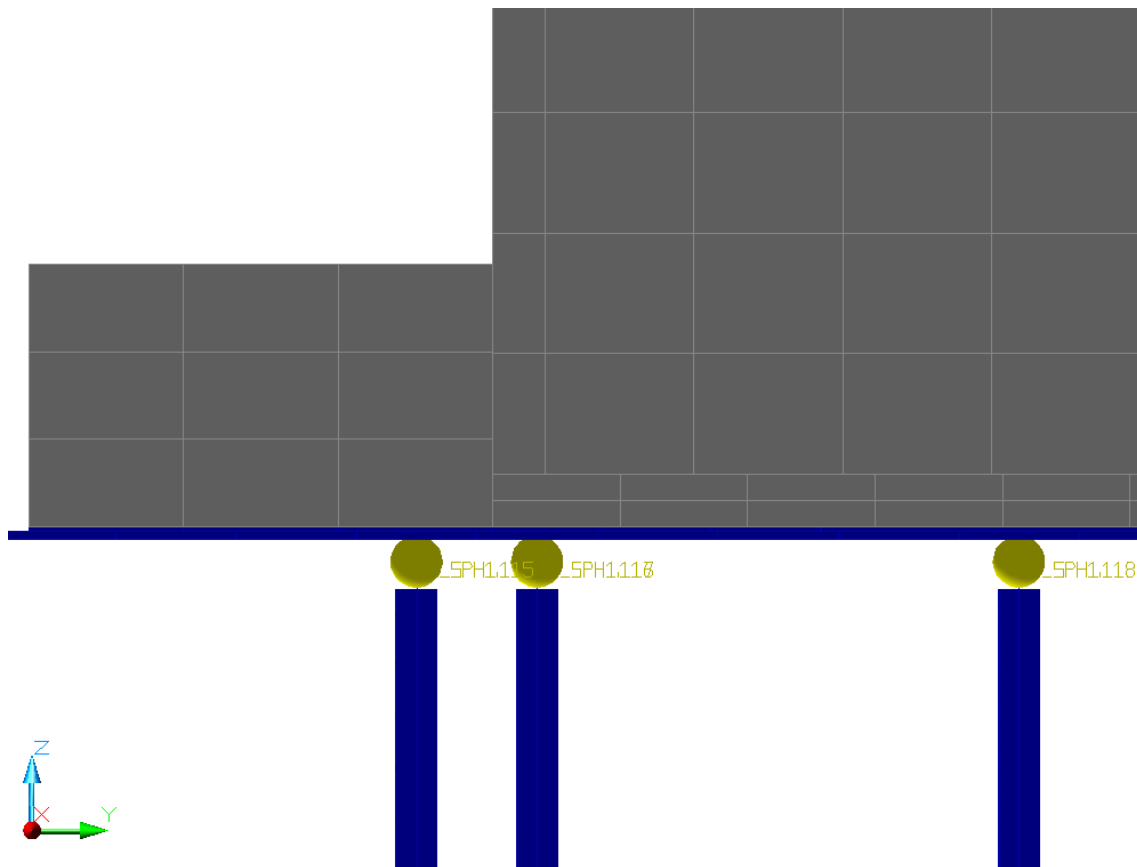
A Figura 9.6 mostra a representação dos sensores instalados no *facesheet* interno do painel sanduíche, com a fiação acoplada e exposta a troca de radiação com o *shroud*.

Figura 9.6 - Termistores instalados no *facesheet* do painel com fiação



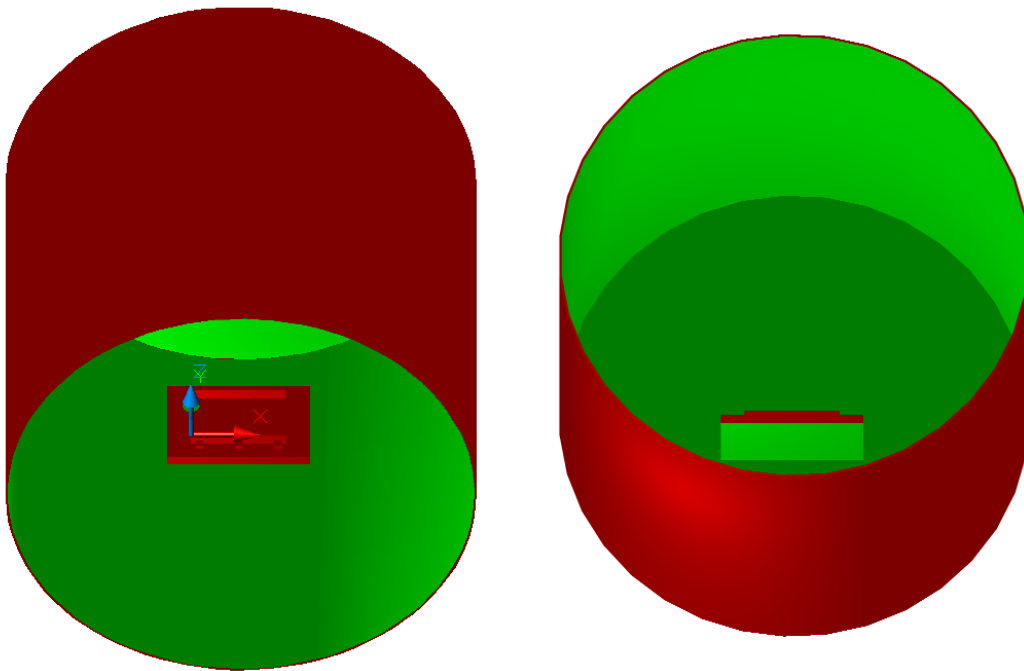
Detalhes da construção e acoplamento dos sensores e fiação no *facesheet* são mostrados na Figura 9.7.

Figura 9.7 - Detalhe dos termistores instalados no *facesheet* do painel, com fiação



Foi criado um grupo de radiação (*Radiation Analysis Group*) sem nó de espaço para representar as trocas de calor por radiação dentro da CVT. O conjunto *dummy*-painel tem a parte que fica interna, quando montada na estrutura em formato de pentágono, sem trocas com o *shroud*, uma vez que além de ser isolada com manta MLI, ainda fica sem diferenças significativas de temperatura na superfície do MLI internamente. Assim, a parte exposta do painel (radiador) tem troca por radiação com o *shroud* da câmara. A Figura 9.8 mostra em verde as superfícies ativas e em vermelho as superfícies inativas dentro do grupo de radiação.

Figura 9.8 – Grupo de radiação ativo no TMM, dentro da CVT 1x1 m

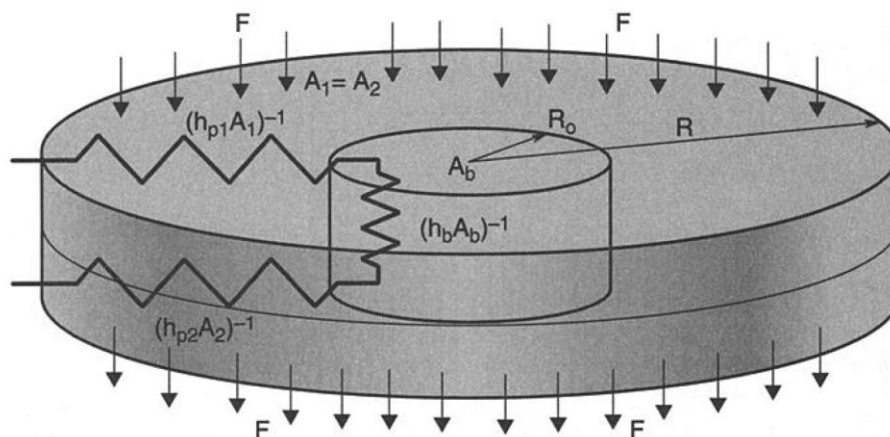


## 9.2 Validação com Modelo Analítico para Cálculo da Condutância na Interface Sem Material

A fim de validar as medidas dos HTC e ajuste com TMM, foi realizada uma análise mais detalhada do acoplamento térmico na região dos parafusos, que corresponde a zona R1 na interface de interesse ( Figura 8.15).

Um modelo analítico para cálculo do acoplamento térmico de uma junta parafusada, com poucos parafusos no perímetro de montagem e sem material de interface foi proposto por Bevans et al (1965). Assume-se que só existe acoplamento térmico entre as duas superfícies através da região dos parafusos, conforme ilustrado na Figura 9.9.

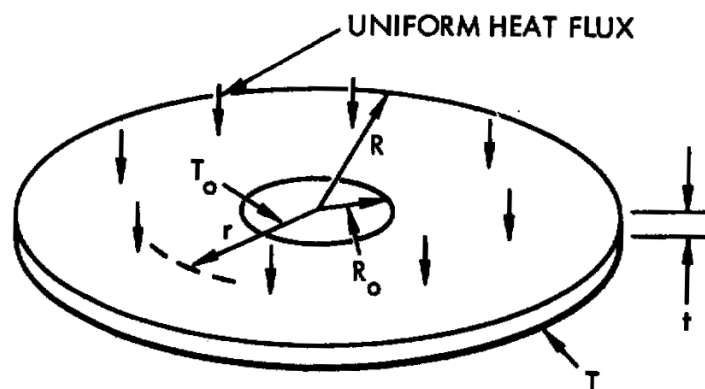
Figura 9.9 - Modelo simplificado de acoplamento térmico em uma interface parafusada



Fonte: Gilmore (2002)

Considera-se um disco de raio  $R$  com fluxo de calor uniforme na sua superfície e condução para uma área central circular (região dos parafusos) com raio  $R_o$  com temperatura constante, Figura 9.10.

Figura 9.10 - Modelo para cálculo de  $h$  por condução do disco



Fonte: Bevans et al. (1965)

O valor de HTC condutivo é calculado pela Equação 9.8.

$$h = \frac{2kt}{R^2} \left[ \frac{1}{\eta_0^2 - \frac{\eta_0^4}{4} - \ln(\eta_0) - \frac{3}{4}} \right], \quad \text{onde } \eta_0 = \frac{R_0}{R} \quad (9.8)$$

Sendo a solução analítica para a equação diferencial

$$Q = -\frac{kt}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) \quad (9.9)$$

com as condições de contorno

$$\begin{cases} r = R, \frac{dT}{dr} = 0 \text{ (isolado)} \\ r = R_0, T = T_0 \end{cases} \quad (9.10)$$

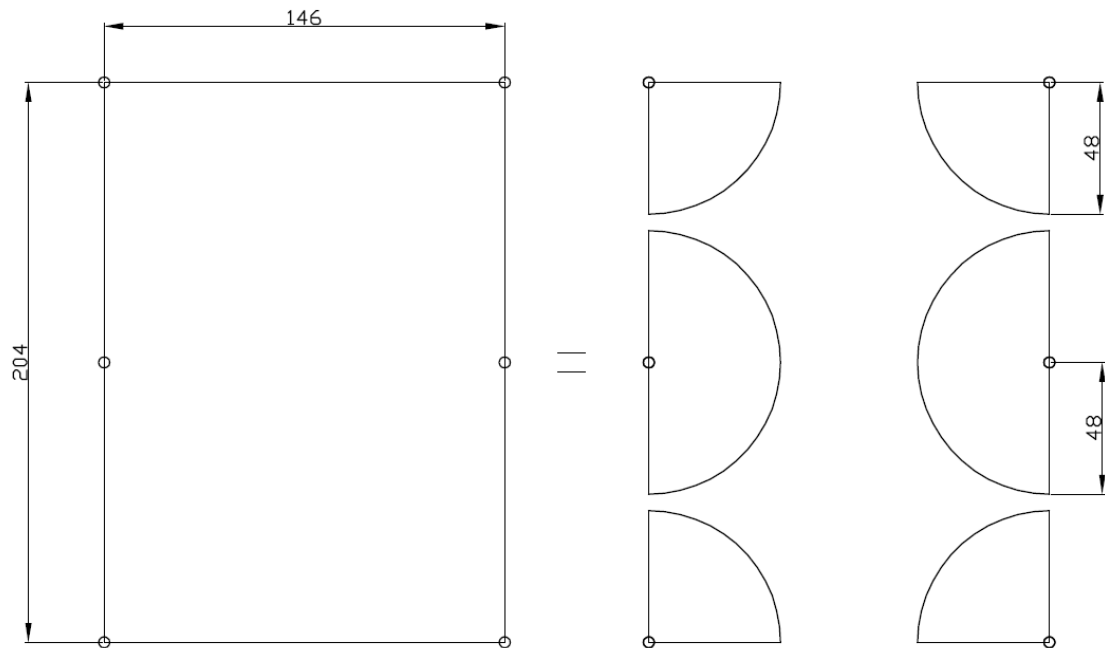
É importante salientar que estas equações também são válidas para configurações de seções de círculos e não somente para círculos inteiros.

Neste trabalho, este modelo foi utilizado para cálculo de HTC (h) através da base do *dummy* e através do *facesheet* do painel.

Para utilizar este modelo analítico, é necessário fazer a aproximação da superfície de estudo retangular em seções de círculos. A Figura 9.11 mostra a interface do *dummy* com o painel subdividida em seis seções de círculos, duas com semi-círculos e quatro com  $\frac{1}{4}$  de círculos, todos com o mesmo raio de 48 mm, para aproximar a geometria recomendada pela referência. Todas as seções somadas são equivalentes a dois círculos inteiros.



Figura 9.11 – Método de subdivisão para correlação analítica



Esta configuração de áreas de contato em forma de setores de círculos atende as condições de contorno da Equação 9.10 e foi recomendada e validada experimentalmente por Bevans et al (1965).

Para o cálculo do acoplamento térmico na região dos parafusos, primeiramente precisamos calcular a pressão exercida nesta região. De acordo com Shigley et al (2005), para calcular a força axial exercida a partir de um torque em um parafuso de aço inox é calculada pela Equação 9.11.

$$F = \frac{M}{0,2D} \quad (9.11)$$

Como o parafuso utilizado nos pontos de fixação do dummy são do tipo M5 (com  $D=5$  mm) e torque aplicado de 5 Nm, o valor da força aplicada é então de 5.000 N.

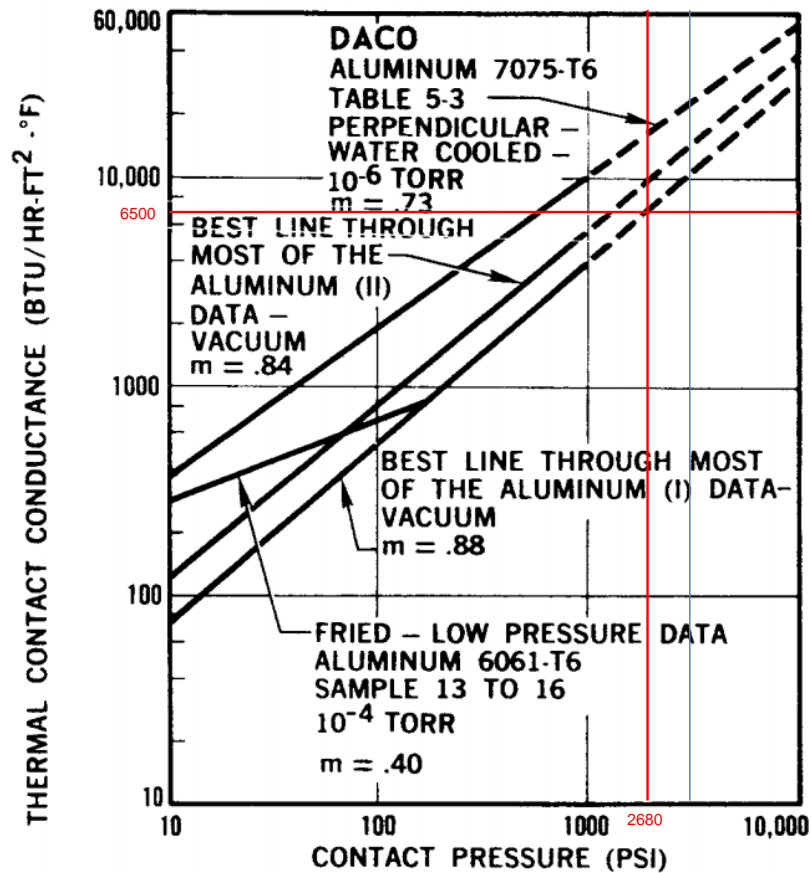
Para calcular a pressão aplicada em cada uma das seis áreas de montagem do dummy, foi utilizada a Equação 9.12.

$$P = \frac{F}{A} \quad (9.12)$$

A área considerada foi a área do pé do *dummy*, descontando a área do furo do parafuso,  $A = 0,00027 \text{ m}^2$ . Portanto, a pressão é de  $P = 18,5 \text{ MPa}$  ( $\sim 2.680 \text{ PSI}$ ).

Conforme a curva experimental de condutância de contato em função da pressão para interfaces de alumínio em vácuo apresentada por Bloom (1964) na Figura 9.12, é possível identificar o valor de HTC de  $6.500 \text{ Btu/hr/ft}^2/\text{°F}$  ( $\sim 36.909 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$ ).

Figura 9.12 – Condutância de contato em função pressão de contato para interface de alumínio em vácuo.



Fonte: Bloom (1964)

Como a área de contato na região do parafuso é de 0,00027 m<sup>2</sup>, a condutância absoluta em cada parafuso será  $G = 9,95 \text{ W/}^\circ\text{C}$ .

Os valores dos coeficientes de transferência de calor calculados foram de  $h_1 = 222,96 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$  para a base do *dummy* e  $h_2 = 76,95 \text{ W/(m}^2/^\circ\text{C)}$  para o *facesheet* do painel.

A Tabela 9.2 apresenta os valores dos coeficientes de transferência de calor e de resistência térmica dos elementos envolvidos no modelo analítico.

Tabela 9.2 – Valores de acoplamento térmico calculados para a interface *dummy*-painel

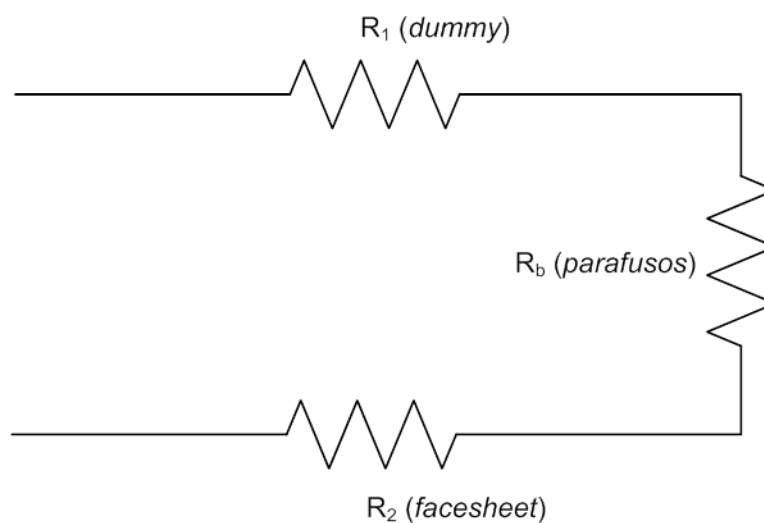
Local	Área (m <sup>2</sup> )	h (W/(m <sup>2</sup> °C))	G (W/°C)	R (°C/W)
base do <i>dummy</i>	0,0145**	373,92	3,23**	0,310** (R <sub>1</sub> )
região dos parafusos	0,00027*	36.909*	59,8**	0,0167** (R <sub>b</sub> )
<i>facesheet</i> do painel	0,0145**	122,25	1,12**	0,893** (R <sub>2</sub> )

\*valores referentes a cada parafuso

\*\*valores referentes ao total de 6 setores de área do contato

O esquema apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foi baseado no modelo simplificado da Figura 9.9 e representa o modelo para o acoplamento térmico *dummy*-painel estudado neste trabalho, com resistências térmicas em série.

Figura 9.13 – Esquema do modelo analítico de acoplamento térmico com resistências em série



Sendo as resistências térmicas em série, para calcular a resistência total, seus valores devem ser somados, Equação 9.13.

$$R = R_1 + R_b + R_2 \quad (9.13)$$

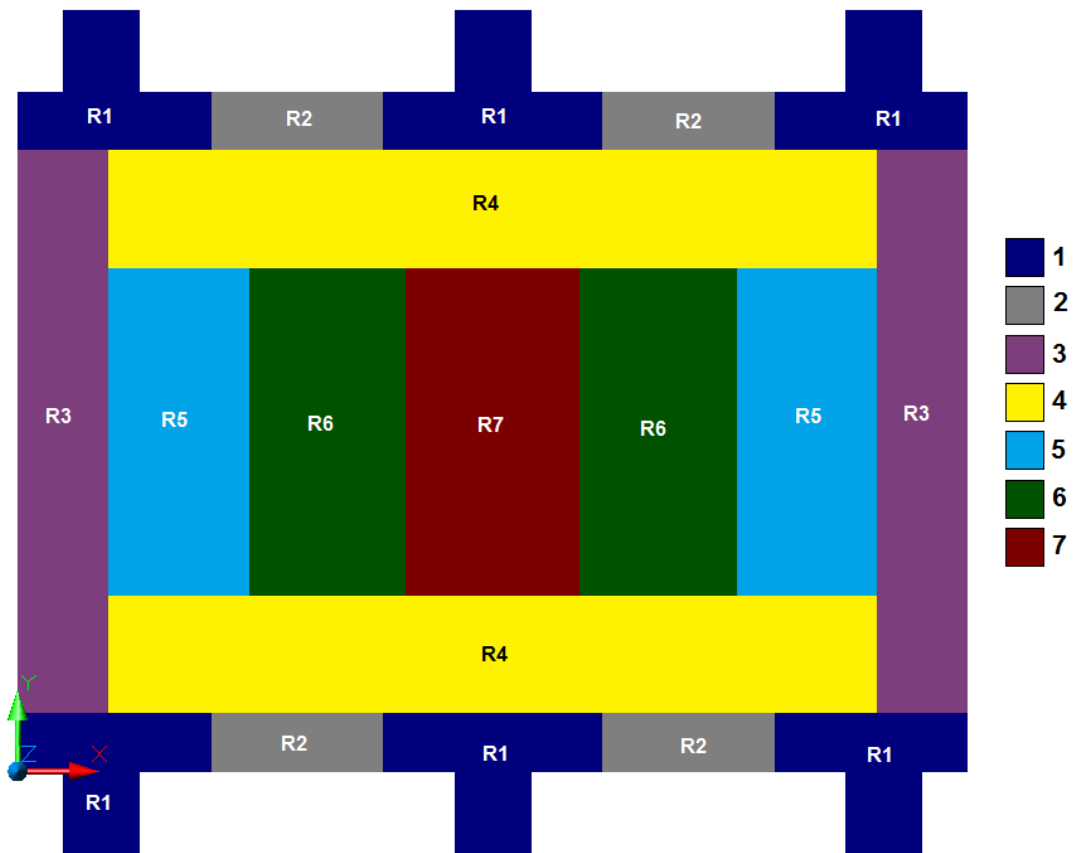
Portanto, o valor de resistência térmica é  $R=1,22 \text{ }^\circ\text{C/W}$  e condutância  $G= 0,82 \text{ W/}^\circ\text{C}$ . Para comparação com os resultados obtidos experimentalmente, o valor de condutância térmica absoluta foi dividido pela área total da interface  $A=0,0298 \text{ m}^2$  e o valor do coeficiente de transferência de calor obtido foi de  $h= 27,5 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$ . O valor da média ponderada na área obtido experimentalmente com ajuste no TMM foi de  $h= 23,3 \pm 13,0 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$ .

Assim, conclui-se que o valor calculado através do modelo analítico proposto por Bevans et al (1965) para a interface *dummy*-painel do presente trabalho, sem material, coincide razoavelmente com o valor levantado experimentalmente e ajustado pelo TMM desenvolvido, considerando a faixa da incerteza. Isso providencia a confiança nos resultados obtidos durante desenvolvimento deste trabalho.

### **9.3 Resistência Térmica de Contato ao Longo da Interface Dividida em Zonas**

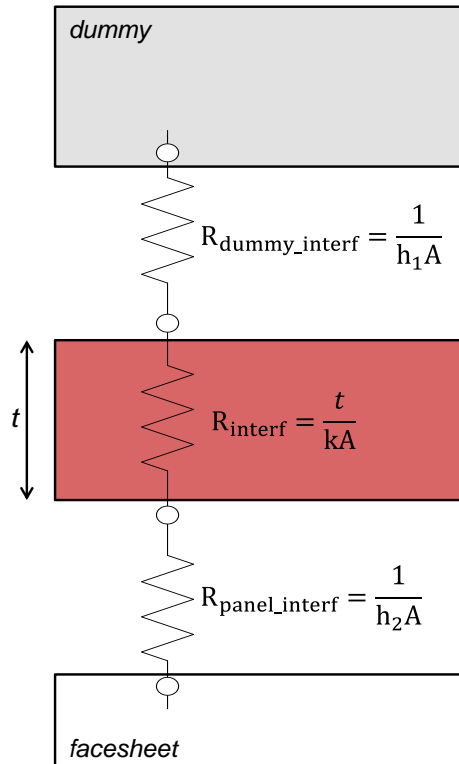
A interface de interesse no estudo, de contato entre o equipamento e o painel, foi dividida em sete zonas. Cada zona será considerada como possuindo valor de resistência de contato homogêneo ao longo da sua área. Assim, a interface fica com sete zonas com resistência térmica de contato distintas, como apresentado no capítulo anterior. Estas zonas foram distribuídas e dimensionadas de acordo com recomendações apresentadas por Welch e Rutter (1989). Foi realizado estudo preliminar para ajustar a configuração das zonas da forma mais coerente de acordo com a possível distribuição de resistência de contato ao longo de área da interface. Os sensores de temperatura do aparato de teste, conforme ilustrado na Figura 9.14 foram distribuídos de maneira a representar cada uma das sete zonas.

Figura 9.14 – Diferentes zonas na interface baseadas nos sensores de temperatura



A Figura 9.15 mostra um esquema das resistências na interface usando analogia com sistemas elétricos.

Figura 9.15 – Esquema de resistências na interface



A resistência equivalente é calculada considerando o sistema em série, ou seja, as resistências são somadas de acordo com a Equação 9.1 e Equação 9.2.

$$R_T = \frac{1}{\bar{h}A} = R_{dummy\_interf} + R_{interf} + R_{panel\_interf} \quad (9.1)$$

$$\frac{1}{\bar{h}A} = \frac{1}{h_1A} + \frac{t}{kA} + \frac{1}{h_2A} \quad (9.2)$$

Considerando que a condutância de contato entre *dummy* e material e entre o painel e o material são iguais,  $h=h_1=h_2$ , temos que:

$$\frac{1}{\bar{h}A} = \frac{2}{hA} + \frac{t}{kA} \quad (9.3)$$

A espessura do material é  $t$  e a condutividade no sentido transversal é  $k$ , substituindo na equação, temos que:

$$\frac{1}{\bar{h}} = \frac{2}{h} + \frac{t}{k} \quad (9.4)$$

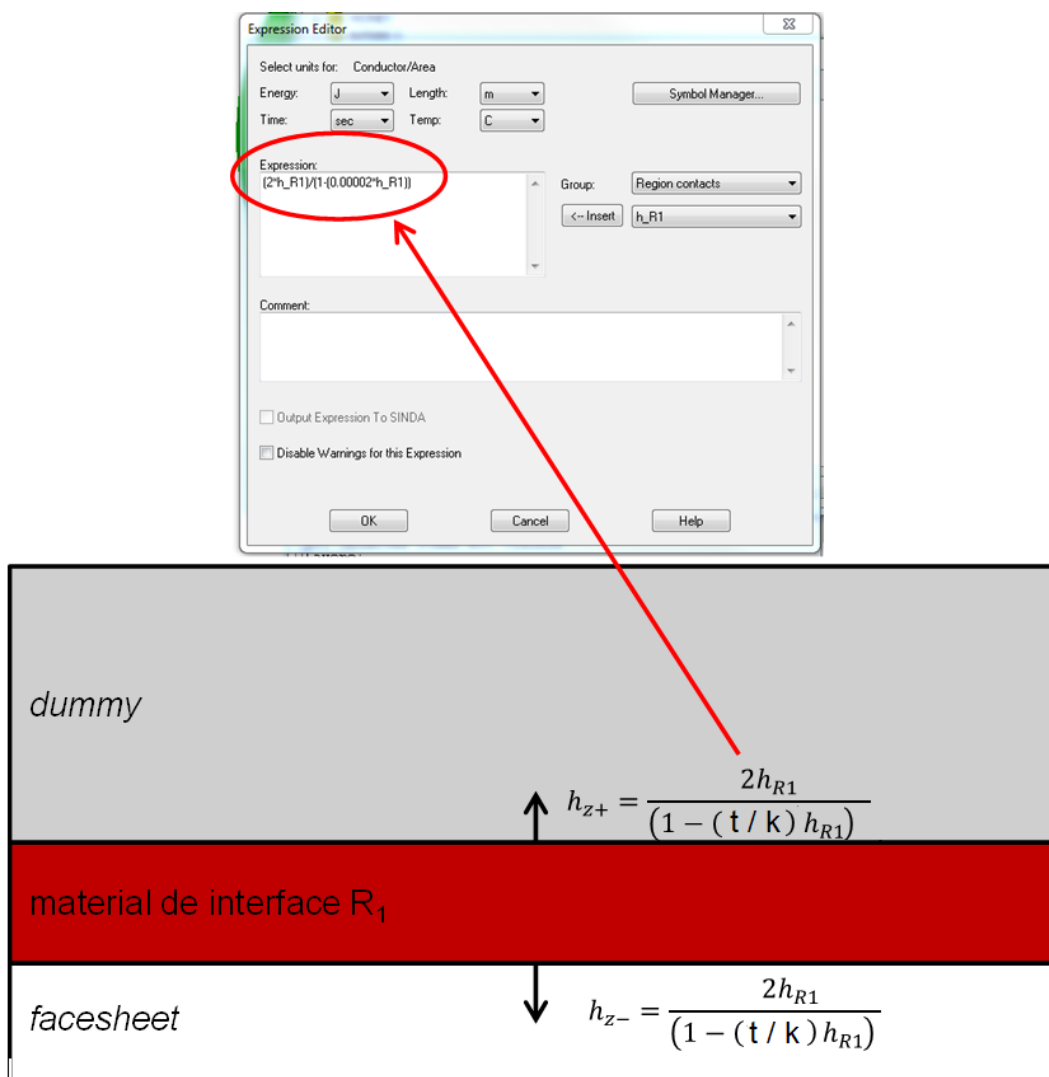
Após manipulações algébricas, chega-se na equação a seguir, a qual pode ser aplicada diretamente no modelo, com os valores de  $t$  e  $k$  para cada material.

$$h = \frac{2\bar{h}}{1 - \left(\frac{t}{k}\right)\bar{h}} \quad (9.5)$$

O valor de  $\bar{h}$  representa a condutância a ser ajustada individualmente para cada uma das sete zonas, como ilustrado na Figura 9.16 para a zona R1 de uma das interfaces.



Figura 9.16 – Esquema de contato na interface no TMM – região 1



#### 9.4 Metodologia de Identificação e Ajuste de Valores Efetivos de Contato nas Zonas da Interfaces

Foi utilizado um processo iterativo para minimizar as diferenças de temperatura entre o TMM e os dados experimentais de teste. Optou-se por fazer a minimização das diferenças de  $\Delta T_i$  ( $T_{i,dummy} - T_{i,painel}$ ) observadas ao longo da interface.

Para facilitar o processo, um programa em Excel/Visual Basic, originalmente desenvolvido por Da Silva (2014) foi adaptado. Trata-se de uma planilha que se

comunica com o Thermal Desktop 4.8 SINDA/Fluint, executando automaticamente diferentes dados de entrada e escrevendo os resultados. Assim, um conjunto de valores de condutâncias pode ser testado no processo de minimização. Com isso, as planilhas de comparação foram automatizadas para cada fase do teste, sendo necessário entrar manualmente com os valores de  $h_1$  à  $h_7$  e executar a aplicação.

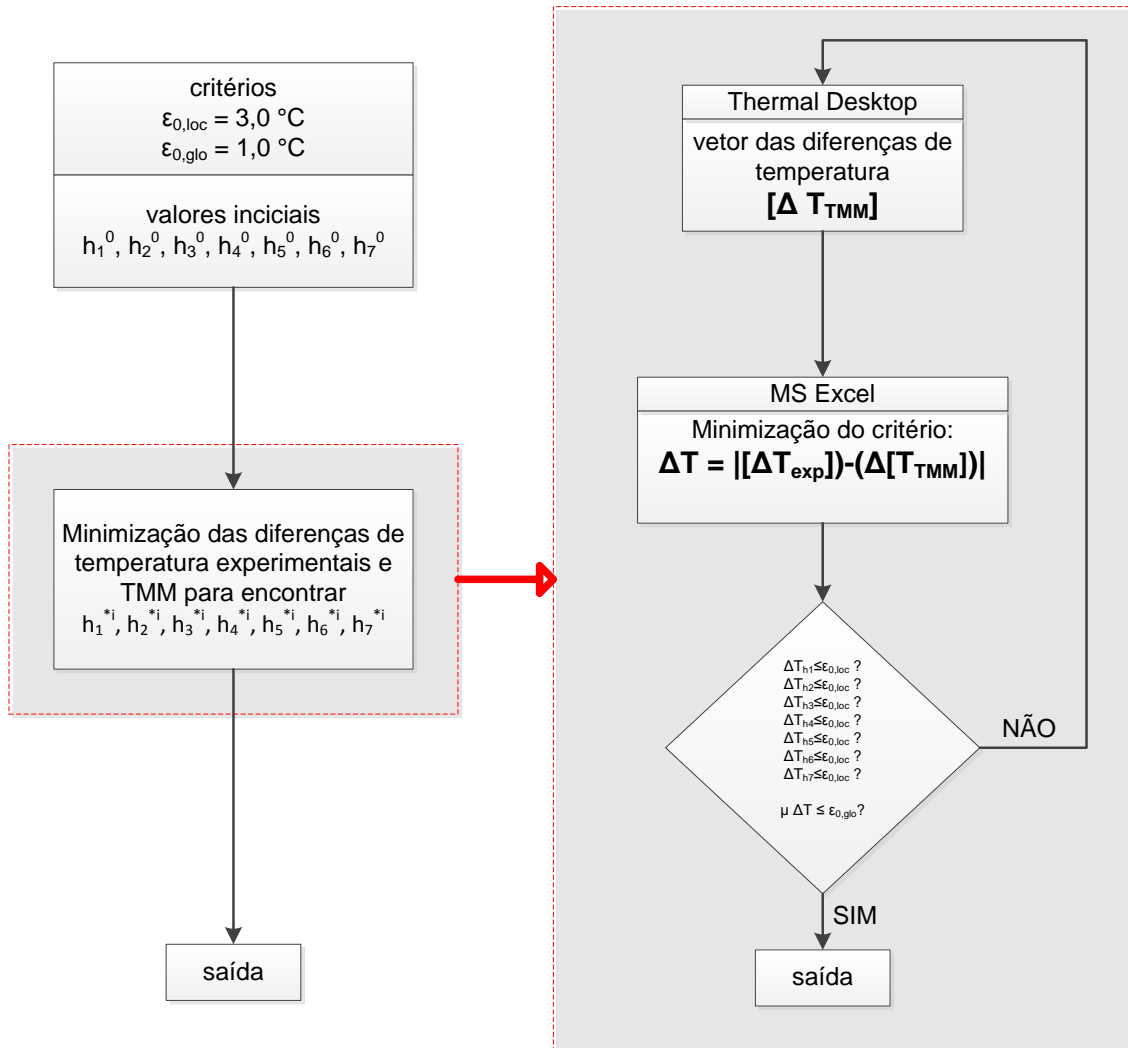
Dois critérios foram adotados, um critério de ajuste local e um global. No critério de local a diferença entre  $\Delta T$  experimental e numérico deve ser menor que 3,0 °C, Equação 9.6. O critério global estabelece que a diferença entre a média das diferenças absolutas deve ser menor que 1,0 °C, Equação 9.7.

$$\max |\Delta T_{i,EXP} - \Delta T_{i,TMM}| \leq \varepsilon_{\varepsilon,local} \quad (9.6)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta T_{i,EXP} - \Delta T_{i,TMM}| \leq \varepsilon_{0,global} \quad , \quad n = 7 \quad (9.7)$$

A Figura 9.17 mostra o fluxograma do ajuste dos valores de  $h_1$  à  $h_7$ .

Figura 9.17 – Fluxograma de ajuste dos valores de h



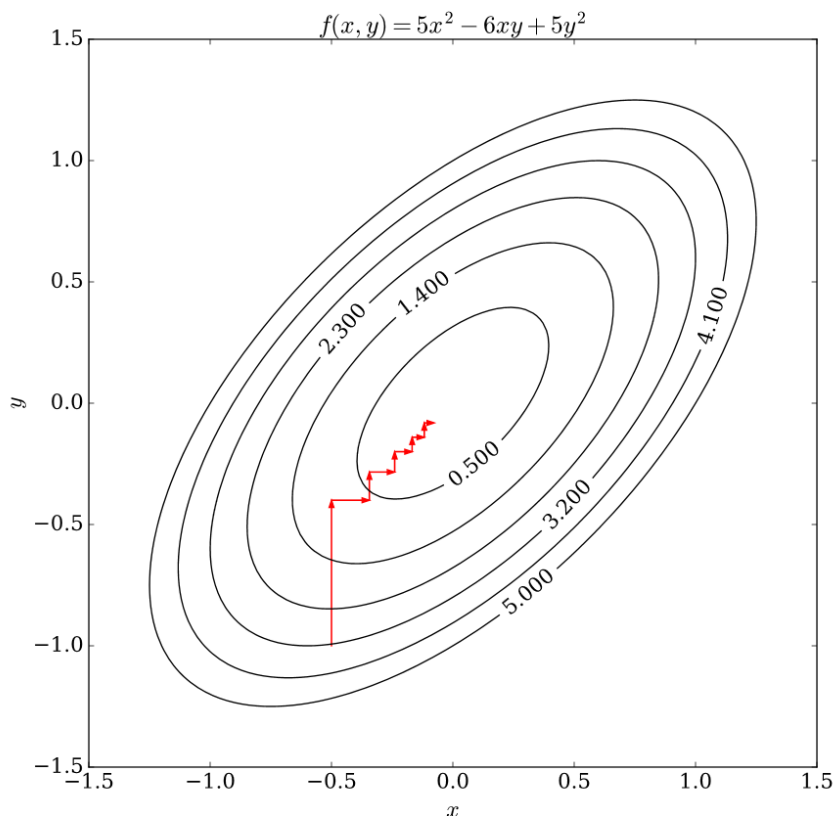
O domínio de otimização normalmente tem a sua topologia regular dentro dos limites das variáveis  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$ ,  $h_5$ ,  $h_6$  e  $h_7$ , assumidos como fisicamente viáveis.

Na busca da solução que leva ao melhor ajuste com base nos dados experimentais foi necessário de usar um algoritmo de otimização simplificado, uma vez que deve-se executar o TMM para cada combinação das variáveis  $h_1$  a  $h_7$ .

Para topologias simples é indicado o algoritmo de otimização *Coordinate Descent*, o qual pode ser efetivo nesta aplicação. A Figura 9.18 mostra a

trajetória da busca utilizando este método para uma função matemática com 2 variáveis, como um exemplo ilustrativo.

Figura 9.18 – Ilustração do processo de busca de solução por *coordinate descent*

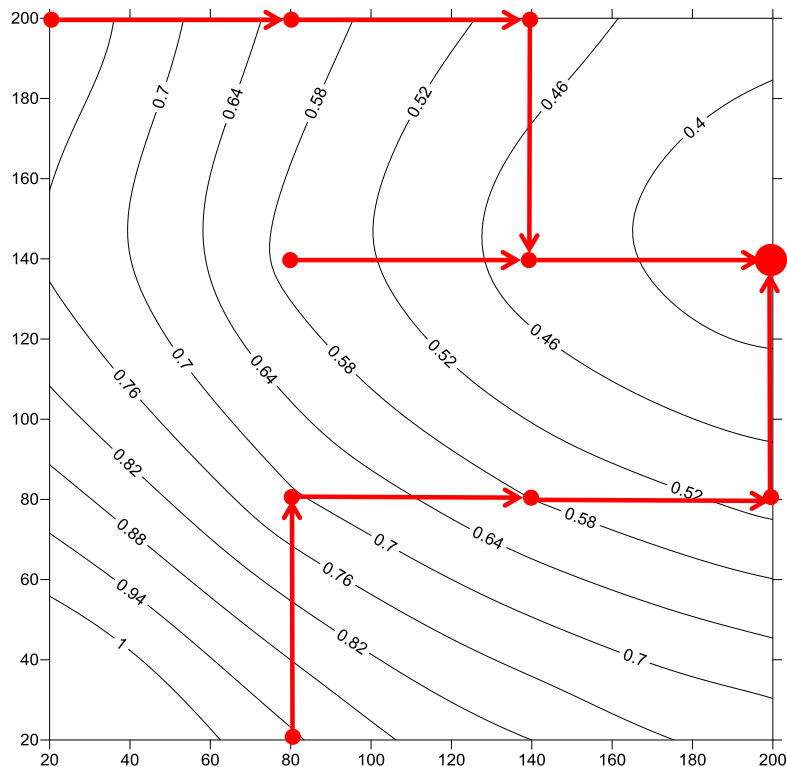


Fonte: Wikipedia (2018)

Pode-se observar que neste exemplo, para chegar no mínimo, precisou-se algumas iterações para minimização recursiva ao longo das coordenadas. Isso acontece devido à topologia, onde as curvas de nível formam figuras com forma semelhante a elipses, onde os eixos principais não são paralelos às coordenadas.

Foram analisadas as topologias de domínios de busca para o presente problema de ajuste. A Figura 9.19 ilustra as possíveis trajetórias de busca para topologia para valores de coordenadas  $h_5$  e  $h_7$ , usando este algoritmo com partida em pontos iniciais diferentes.

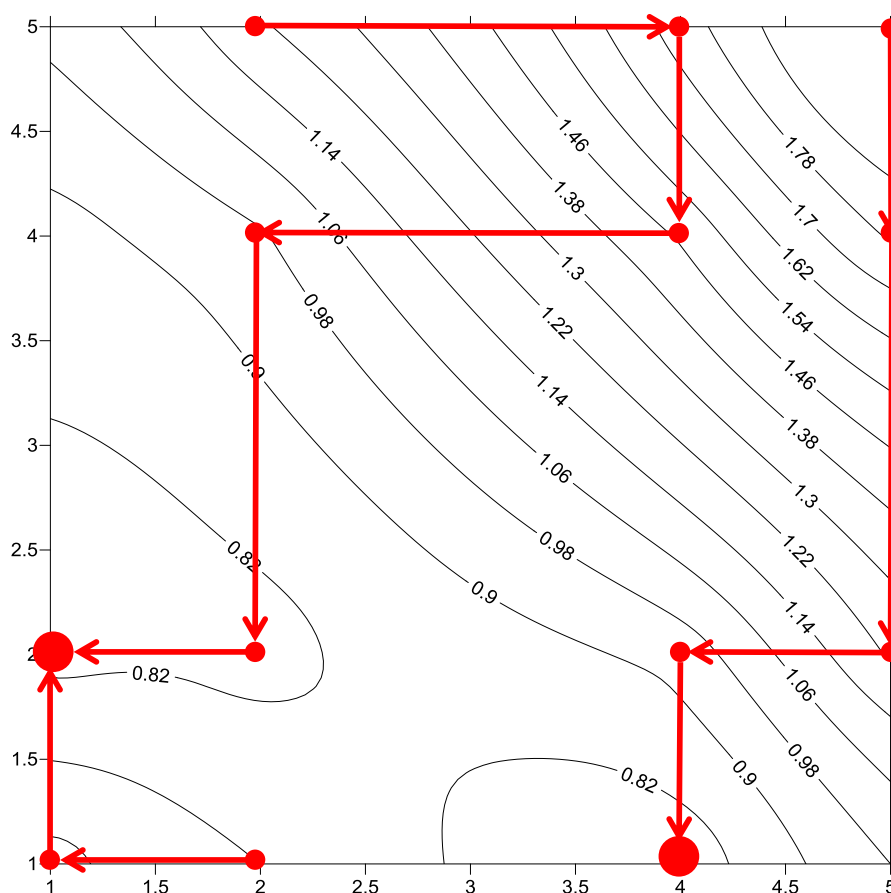
Figura 9.19 – Exemplo de trajetórias da busca para interface com graxa térmica, T1F13 domínio  $h_5$  e  $h_7$ .



É possível notar que independente do ponto da partida, as trajetórias levam ao mínimo global. Conclui-se também que neste tipo de topologia o elipsóide, embora cortado pelos limites dos valores  $h_5$  e  $h_7$ , tem seus eixos principais paralelos às coordenadas e por isso o algoritmo leva para o mínimo sem iterações adicionais. No exemplo da Figura 9.18 isso não acontece e são necessárias várias tentativas para se atingir o mínimo.

Entretanto, algumas combinações de variáveis podem gerar uma topologia mais complexa, a qual contém dois mínimos locais, conforme ilustrado na Figura 9.20. Neste caso o algoritmo deve ser aplicado a partir de diferentes pontos de partida para chegar nos mínimos globais.

Figura 9.20 - Exemplo de trajetórias da busca para interface sem material, T1F13 domínio h5 e h7.



Foram selecionados os casos mais representativos para fazer o ajuste do TMM com identificação dos valores de HTC  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$ ,  $h_5$ ,  $h_6$  e  $h_7$ . Estes casos têm como objetivo a identificação da influência da temperatura, ciclos térmicos e estocagem nos HTCs de contato.

### 9.5 Resultados de Identificação de Valores Efetivos de Contato nas Interfaces

Os valores de resistência térmica de contato foram obtidos na forma de HTC para cada zona. Foram selecionados quatro fases do Teste 1, com potência distribuída homogeneamente, de acordo com a

Figura 6.4, a fim de identificar a influência da temperatura. Os valores de ajuste do coeficiente de transferência de calor  $h$ , em ( $W/m^2/^\circ C$ ), para cada uma das 7 zonas, são apresentados na Tabela 9.3. A faixa de incerteza de variação dos valores de  $h$  ficou sempre dentro de 5% de variação, ou seja,  $h_i \pm 5\%$ .

Tabela 9.3 – Valores de ajuste de  $h$  ( $W/m^2/^\circ C$ ) para o Teste 1, antes da ciclagem

<b>Teste 1 / Fase 22 – H1+H2+H3@-20 °C</b>							
<b>Conjunto</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>
sem material	95	8	15	12	1	0.1	6
eGraf	1300	1200	300	110	1	3	1
folha de índio	1400	1200	45	120	1	1	10
graxa térmica	1300	1400	950	550	700	400	700
RTV566	1100	1300	800	550	60	40	60
<b>Teste 1 / Fase 21 – H1+H2+H3@0 °C</b>							
<b>Conjunto</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>
sem material	110	18	20	1	1	1	2
eGraf	1300	1200	120	70	5	3	2
folha de índio	1300	1200	25	130	1	1	4
graxa térmica	1300	1400	950	550	400	400	300
RTV566	1100	1300	800	550	60	40	60
<b>Teste 1 / Fase 10 – H1+H2+H3@+20 °C</b>							
<b>Conjunto</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>
sem material	100	20	14	1	3	4	2
eGraf	1300	1200	170	30	3	13	4
folha de índio	1300	1200	30	100	1	1	1
graxa térmica	1300	1400	950	550	120	400	170
RTV566	1300	1400	800	550	60	80	110
<b>Teste 1 / Fase 13 – H1+H2+H3@+45 °C</b>							
<b>Conjunto</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>
sem material	180	20	25	6	1	3	2
eGraf	1300	1050	350	45	4	17	14
folha de índio	1300	1050	70	18	3	3	3
graxa térmica	1000	1150	850	650	130	750	125
RTV566	1000	1100	600	650	75	80	45

É possível observar que com condições de contorno equivalentes para todas as amostras, os valores de  $h$  ajustados são muito diferentes para materiais de interface diferentes. A interface sem material apresenta os valores mais baixos, ao passo que a interface com graxa térmica apresenta valores mais altos. Ainda, é possível notar um aumento de HTC da graxa térmica nas zonas centrais  $R_5$ ,  $R_6$  e  $R_7$  em temperaturas baixas. Uma possível explicação é a

relação do aumento da tensão superficial da graxa, a qual é função a temperatura e melhora a molhabilidade, que combinada com os efeitos da CTE, leva à uma possível redistribuição das bolhas de ar captadas.

Com o objetivo de ajudar a identificação da influência da temperatura em cada uma das interfaces, fez-se o rearranjo dos dados da Tabela 9.3, separando por material e calculando a média ponderada na área das zonas ( $\mu_{h,pond}$ ), Tabela 9.4.

Tabela 9.4 - Valores de ajuste de  $h$  ( $W/m^2/^\circ C$ ) para o Teste 1, antes da ciclagem, com média ponderada na área das zonas

<b>Sem material</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F22@-20 °C	95	8	15	12	1	0,1	6	<b>20,3</b>
T1F21@0 °C	110	18	20	1	1	1	2	<b>20,6</b>
T1F10@+20 °C	100	20	14	1	3	4	2	<b>19,1</b>
T1F21@+45 °C	180	20	25	6	1	3	2	<b>33,0</b>
<b>eGraf</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F22@-20 °C	1300	1200	300	110	1	3	1	<b>324,9</b>
T1F21@0 °C	1300	1200	120	70	5	3	2	<b>290,3</b>
T1F10@+20 °C	1300	1200	170	30	3	13	4	<b>288,9</b>
T1F21@+45 °C	1300	1050	350	45	4	17	14	<b>311,8</b>
<b>Folha de índio</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F22@-20 °C	1400	1200	45	120	1	1	10	<b>307,0</b>
T1F21@0 °C	1300	1200	25	130	1	1	4	<b>291,3</b>
T1F10@+20 °C	1300	1200	30	100	1	1	1	<b>284,1</b>
T1F21@+45 °C	1300	1050	70	18	3	3	3	<b>262,0</b>
<b>Graxa térmica</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F22@-20 °C	1300	1400	950	550	700	400	700	<b>781,1</b>
T1F21@0 °C	1300	1400	950	550	400	400	300	<b>686,2</b>
T1F10@+20 °C	1300	1400	950	550	120	400	170	<b>632,1</b>
T1F21@+45 °C	1000	1150	850	650	130	750	125	<b>630,1</b>
<b>RTV566</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F22@-20 °C	1100	1300	800	550	60	40	60	<b>502,2</b>
T1F21@0 °C	1100	1300	800	550	60	40	60	<b>502,2</b>
T1F10@+20 °C	1300	1400	800	550	60	80	110	<b>549,5</b>
T1F21@+45 °C	1000	1100	600	650	75	80	45	<b>478,7</b>



A Tabela 9.4 mostra valores de HTC para 5 níveis da temperatura, de -20 a +45 °C. Com o cálculo da média ponderada na área de cada uma das zonas  $\mu_{h,pond}$ , a comparação dos valores entre os materiais fica mais evidente. A Tabela 9.5, com as médias das  $\mu_{h,pond}$  calculadas, mostra que o conjunto sem material apresenta desempenho térmico de uma ordem de grandeza menor que os demais e que dentre os conjuntos com material a graxa térmica apresenta o melhor desempenho, próximo ao RTV566 e que os materiais eGraf e folha de índio tem desempenho semelhante e mediano.

Tabela 9.5 – Média de  $\mu_{h,pond}$  por conjunto

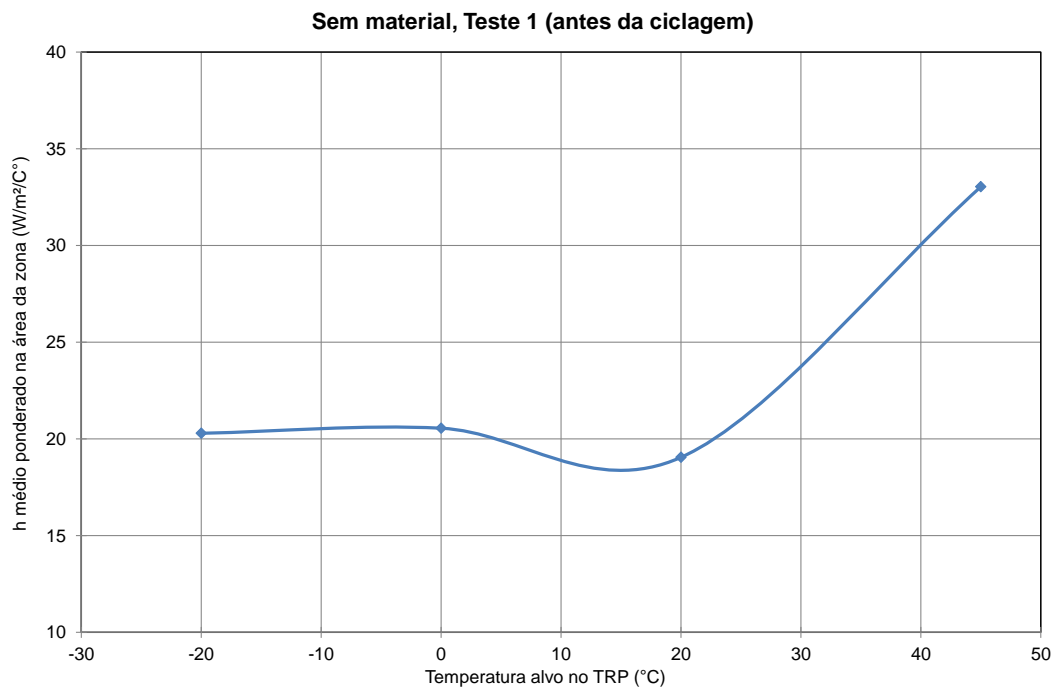
Conjunto	Distância média de medidas de planicidades (Tabela C.3) (mm)	Média de $\mu_{h,pond}$ ( $W/m^2/^\circ C$ )
sem material	0.060	23,3 ± 13,1
eGraf	0.055	304,0 ± 34,9
folha de índio	0.050	286,1 ± 37,4
graxa térmica	0.058	682,4 ± 141,5
RTV566	0.051	508,2 ± 59,4

A incerteza com valor relativamente grande na Tabela 9.5 se deve ao fato da média ser feita utilizando ajustes de h em diferentes patamares de temperatura.

A variação de planicidade é de  $\pm 9\%$ , o que não afeta de maneira significativa os valores de HTC obtidos para diferentes materiais e fica dentro das faixas de incerteza.

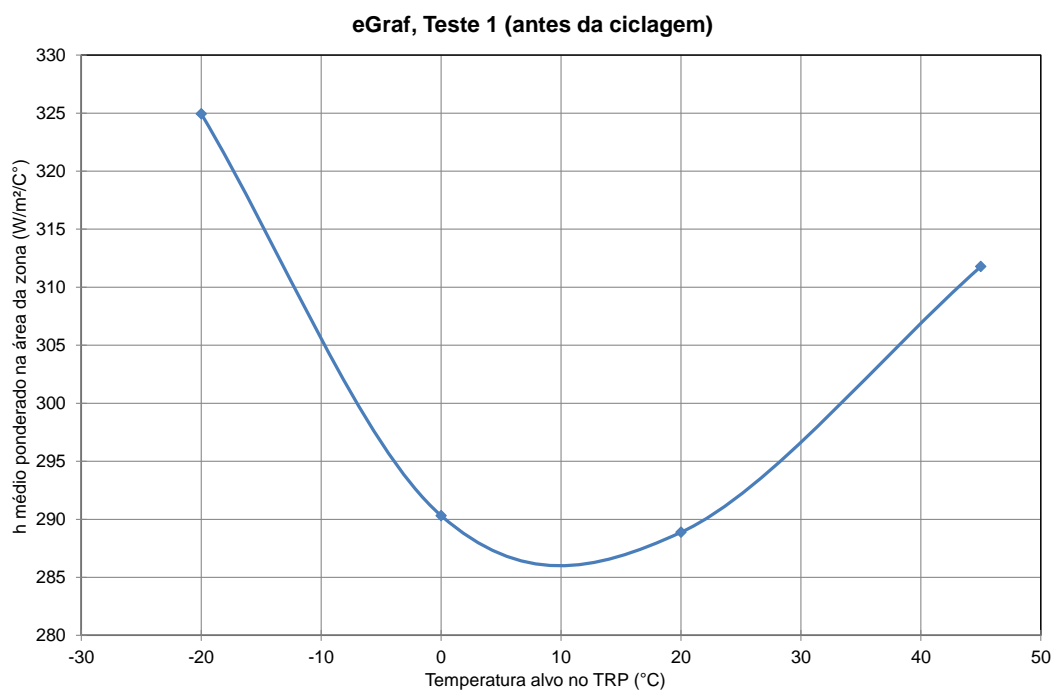
Visando a visualização do desempenho térmico de cada um dos conjuntos em função da temperatura, os valores de  $\mu_{h,pond}$  foram plotados e são apresentados da Figura 9.21 a Figura 9.25.

Figura 9.21 – h médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – sem material



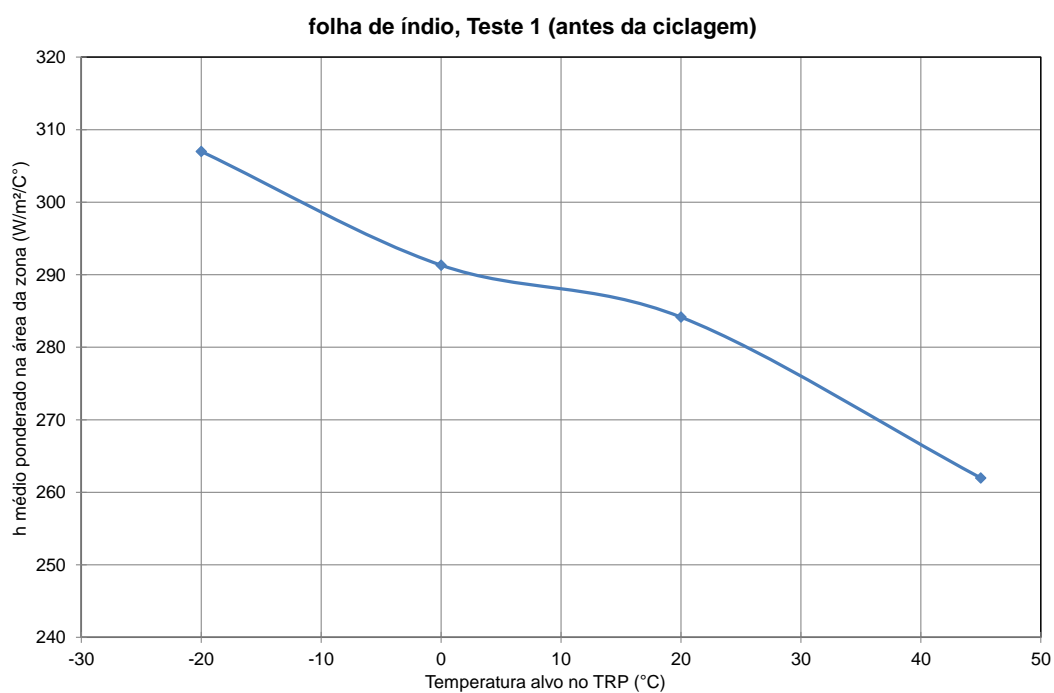
A interface sem material teve um aumento significativo no valor de h com o aumento da temperatura, o que pode ser explicado pela redução da dureza superficial com aumento de temperatura para ligas de alumínio.

Figura 9.22 - h médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – eGraf



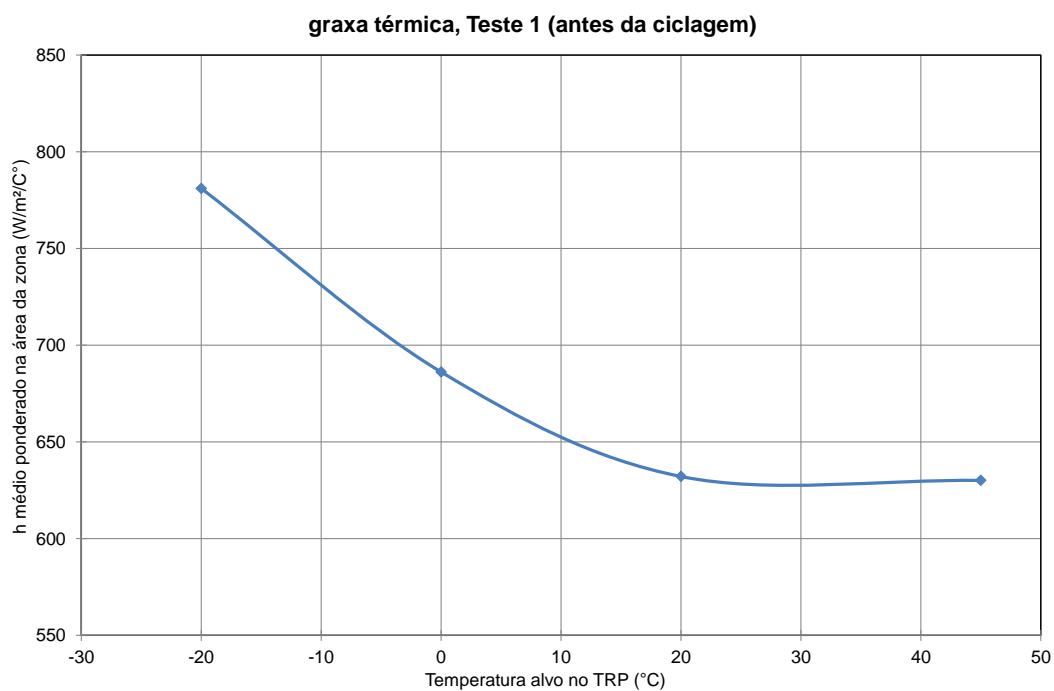
O conjunto com eGraf apresentou melhor desempenho com temperaturas nos extremos, tanto baixas como altas. Esta tendência de aumento de HTC em temperaturas muito diferentes da ambiente pode ser explicada pelo efeito de acomodação dos materiais com diferentes CTE.

Figura 9.23 -  $h$  médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – folha de índio



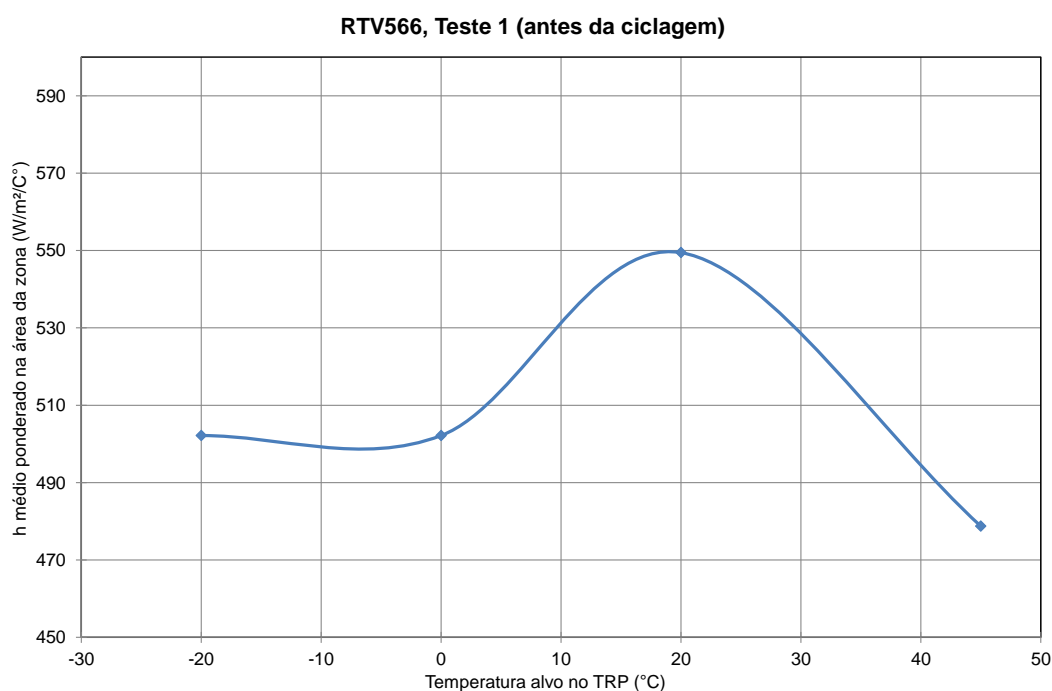
O conjunto com folha de índio teve uma piora no desempenho com o aumento da temperatura. Pode ser que haja superposição dos efeitos de diferentes CTE e variações de dureza com temperatura.

Figura 9.24 -  $h$  médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – graxa térmica



O conjunto com graxa térmica teve uma piora no desempenho com o aumento da temperatura.

Figura 9.25 -  $h$  médio ponderado na área das zonas em função da temperatura alvo do TRP – RTV566



O conjunto com RTV566 apresentou desempenho pior em baixas e altas temperaturas, com pequeno aumento de  $h$  na faixa de +20 °C. Confirmando resultados publicados por Johnson (2007).

## 9.6 Avaliação da Estabilidade do Contato Térmico

A fim de verificar a estabilidade do desempenho térmico depois de ciclagem térmica, partindo do caso de referência, com alvo no TRP em +20 °C foi feito o ajuste dos valores de  $h_1$  a  $h_7$  para uma fase antes e depois da ciclagem, para todos os materiais de interface, Tabela 9.6.

Tabela 9.6 – Valores ajustados de h antes e depois da ciclagem térmica com alvo de +20 °C no TRP

<b>Sem material</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F10@+20 °C	100	20	14	1	3	4	2	<b>19.1</b>
T1F34@+20 °C	110	18	13	0.1	2	3	2	<b>19.8</b>
<b>eGraf</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F10@+20 °C	1300	1200	170	30	3	13	4	<b>288.9</b>
T1F34@+20 °C	1300	1300	150	15	2	12	3	<b>287.5</b>
<b>Folha de índio</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F10@+20 °C	1300	1200	30	100	1	1	1	<b>284.1</b>
T1F34@+20 °C	1300	1250	25	100	0.1	0.1	0.1	<b>285.8</b>
<b>Graxa térmica</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F10@+20 °C	1300	1400	950	550	120	400	170	<b>632.1</b>
T1F34@+20 °C	1300	1400	950	550	100	400	170	<b>629.6</b>
<b>RTV566</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F10@+20 °C	1300	1400	800	550	60	80	110	<b>549.5</b>
T1F34@+20 °C	1300	1400	800	550	70	80	60	<b>543.6</b>

É possível notar que nenhum dos conjuntos apresentou mudança significativa de desempenho térmico antes e depois da ciclagem nos extremos de temperatura de -55 à +70 °C. Este é um dado bastante importante e confortável, pois o Teste de Balanço Térmico TBT, o qual avalia o desempenho térmico dos equipamentos, é normalmente realizado antes do Teste de Ciclagem Térmica em Vácuo TVT.

Ainda com o caso básico de referência com alvo de +20 °C no TRP, foi feito o ajuste dos valores de  $h_1$  à  $h_7$  para uma fase antes e depois da estocagem de seis meses, para todos os materiais de interface, Tabela 9.7.

Tabela 9.7 - Valores ajustados de h antes e depois da estocagem de seis meses, com alvo de +20 °C no TRP

<b>Sem material</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F34@+20 °C	110	18	13	0.1	2	3	2	<b>19.8</b>
T2F13@+20 °C	90	13	13	12	1	1	0.1	<b>18.9</b>
<b>eGraf</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F34@+20 °C	1300	1300	150	15	2	12	3	<b>287.5</b>
T2F13@+20 °C	1300	1250	160	25	3	12	3	<b>288.7</b>
<b>Folha de índio</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F34@+20 °C	1300	1200	30	100	1	1	1	<b>284.1</b>
T2F13@+20 °C	1300	1300	35	190	0.1	0.1	30	<b>316.6</b>
<b>Graxa térmica</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F34@+20 °C	1300	1400	950	550	100	400	170	<b>629.6</b>
T2F13@+20 °C	1250	1400	750	550	70	80	30	<b>525.1</b>
<b>RTV566</b>								
<b>Fase</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>	<b><math>\mu_{h,pond}</math></b>
T1F34@+20 °C	1300	1400	800	550	60	80	110	<b>549.5</b>
T2F13@+20 °C	1300	1400	950	550	85	75	330	<b>604.3</b>

Para os valores ajustados de h antes e depois do armazenamento de seis meses, os conjuntos sem material e com eGraf não apresentaram alterações significativas. Os conjuntos com folha de índio e RTV566 apresentaram um aumento de aproximadamente 10% no valor de h, tal melhora pode ter ocorrido pela melhor acomodação do material nas imperfeições das superfícies. O conjunto que mais se destaca é o com graxa térmica, pois apresentou um valor de h 16,6% mais baixo após a estocagem, o que pode ser explicado pela degradação da graxa, uma vez que é composta de elementos que podem se separar ou evaporar.



## 10 CONCLUSÕES

O aparato de testes que representa a interface típica de equipamentos eletrônicos e painéis de satélites foi projetado e construído e permite o teste de cinco diferentes interfaces simultaneamente em condições térmicas equivalentes em vácuo. Durante o estudo, dois testes foram realizados usando quatro diferentes materiais nas interfaces, em diferentes patamares de temperatura, englobando os limites de qualificação de equipamentos eletrônicos usados em satélites, com aplicação de potência distribuída e concentrada, ciclagem de temperatura e estocagem de seis meses entre os testes.

Adicionalmente, uma interface sem material de interface foi testada. Todos os testes revelaram que esta interface fica muito mais quente em condições de vácuo, comparada com as demais para uma mesma potência e mesmas condições de contorno.

Chegou-se a conclusão da grande importância de aplicar material de interface na região dos pés para o caso dos materiais fluidos (graxa térmica e RTV566), pois nesta região pode aparecer uma diferença de temperatura local de até uma ordem de grandeza quando se compara à interface sem material aplicado. Ainda, porque esta é a região fornece uma grande contribuição no contato global da interface.

Coincidindo com resultados apresentados por Rodriguez-Ruiz et al. (2008), as interfaces com eGraf e folha de índio apresentaram variações bastante grandes na resistência térmica de contato entre o *dummy* e o painel, ao passo que as outras interfaces apresentaram variações menores.

Foram levantados dados comparativos inéditos das diferenças de temperatura encontradas nas interfaces, considerando o aumento do gradiente da diferença quando a potência é aplicada de maneira não homogênea. Quando uma mesma potência foi aplicada distribuída ao longo da área ou concentrada em uma das extremidades, todos os conjuntos apresentam um aumento na

variação das diferenças de temperatura ao longo da interface, chegando a 44% de aumento com a concentração da dissipação de calor em uma área três vezes menor.

Ainda, foram avaliadas as diferenças de desempenho dos materiais das interfaces para condições térmicas semelhantes em pressão ambiente e vácuo. Foi revelado que as interfaces tem comportamento térmico bastante diferente e não conservador (ficam mais frias) quando testadas em laboratório com ambiente a pressão atmosférica. Portanto, estes testes realizados a pressão ambiente não são representativos do comportamento térmico das mesmas interfaces em vácuo (ficam mais quentes).

Um TMM detalhado foi desenvolvido e permitiu o ajuste de valores de coeficientes de troca de calor  $h$  parametrizados em sete diferentes zonas ao longo da interface, o que permitiu a identificação da não alteração do desempenho térmico dos diferentes materiais após a realização de ciclos térmicos, o que é de suma importância quando se leva em conta que os testes de TBT são realizados antes dos testes TVT de satélites integrados.

Foram revelados os valores globais de coeficiente de troca de calor  $h$  de 10,2 W/(m<sup>2</sup>°C) para a interface sem material até 769,9 W/(m<sup>2</sup>°C) para a interface com graxa térmica, considerando as incertezas. O TMM e a metodologia de ajuste foram validados através de um modelo analítico padrão para a interface sem material.

Quanto à dependência da temperatura, a interface sem material teve melhora no desempenho térmico com o aumento de temperatura ao passo que os conjuntos com folha de índio e graxa térmica apresentaram piora com o aumento da temperatura.

Ainda, observou-se uma importante degradação no desempenho da graxa térmica após estocagem, o coeficiente de transferência de calor global ficou 16,6% menor, enquanto os valores de  $h$  para folha de índio e RTV566 ficaram aproximadamente 10% maiores.

Um estudo com interface transparente foi conduzido a fim de revelar qualitativamente a área de contato provida pelos materiais graxa térmica e RTV566, ambos fluidos e com mesma metodologia de aplicação. Foi observado que a área de contato na interface com graxa térmica tem uma melhora quando a mesma é submetida a vácuo enquanto a interface com RTV566 curado permanece sem alteração.

Foi proposta uma metodologia prática para calcular a espessura mínima de aplicação de materiais fluidos, baseada nas medidas de planicidade e rugosidade tanto da base do equipamento como na área de montagem no painel.

Como trabalho futuro, propõe-se que os teste sejam repetidos, com especificação de tempo reduzido para diferentes métodos de aplicação e espessura dos materiais fluidos graxa térmica e RTV566.

Ainda, investigar as correlações entre os mapas de planicidade e mapas de  $\Delta T$  nas interfaces.

Outros novos materiais de interface podem ser testados e comparados utilizando o aparato desenvolvido.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEVANS, J. T.; ISHIMOTO, T.; LOYA, B. R.; LUEDKE, E. E. **Predictions of space vehicle thermal characteristics**. Ohio: Air Force Flight Dynamic Laboratory, 1965. (Technical Report AFFDL-TR-65-139).

BLOOM, M. F. **Thermal contact conductance in a vacuum environment**. Santa Mônica-CA: Douglas Aircraft Company, 1964. 107p. (Douglas report SM-47700).

COSTA, R. L. **Influência da fiação de sensores de temperatura exposta em ambiente de baixa temperatura**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, 2015

CROMWELL. Disponível em: <https://www.cromwell.co.uk>. Acesso em: 10 mar. 2018.

DA SILVA, D. F. **Modelo de projeto de controle térmico de satélites baseado em experimentos e otimizações**: aplicação em satélite estabilizado em três eixos. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014

GARCIA, E. C. **Análise de incerteza em experimentação**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), 2003. (Notas de aula).

GARCIA, E. C.; CARAJILESCOV, P. Medidas de condutividade térmica de sólidos e resistência térmica de contato sob vácuo. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v.8, p. 141-145, 1989.

GILMORE, D. G. **Spacecraft thermal control handbook**: fundamental technologies. 2.ed. El Segundo: The Aerospace Press, USA, 2002. 836p.

GLASGOW, S. D.; KITTREDGE, K. B.; **Performance testing of thermal interface filler materials in a bolted aluminum interface under thermal/vacuum conditions.** Washington: National Aeronautics and Space Administration – NASA, 2003. (NASA/TM-2003-212500).

GONCHAROV, K.; KOCHETKOV, A.; KALACHEVA, L.; ANTONOV, V. **Comparison of contact thermal resistance values obtained when different thermal conductive materials are used for units mounting to thermal honeycomb panels.** Khimki, Russia: Lavochkin Association, 2000.

GORDON, D., G. **Spacecraft Thermal Design.** RCA Lecture Notes, Estados Unidos da America, 1965.

GRAFTECH INTERNATIONAL. **Graftech products.** Disponível em: <http://www.graftech.com>. Acesso em: 21 jun. 2018

GWINN, J. P.; WEBB, R. L. Performance and testing of thermal interface materials. **Microelectronics Journal**, v.34, p. 215-222, 2003.

ISACHENKO V. P.; OSIPOVA V. A.; SUKOMEL A. S. **Heat transfer.** Moscou: Mir Publishers, 1969.

JOHNSON, D. Thermal interface performance of RTV when used between aluminum electronic unit baseplates and graphite equipment panels. In: SPACECRAFT THERMAL CONTROL WORKSHOP, 2007, El Segundo-CA. **Proceedings...** 2007.

KLINE, S. J.; MCCLINTOCK, F. A. **Describing uncertainties in single-sample experiments.** **Mechanical Engineering**, v.75, p.3-8, 1953.

MANTELLI, M. B. H.; SRIDHAR, M. R.; YOVANOVICH, M. M. Influence of elastic and plastic contact models on the overall thermal resistance of bolted joints. In: IEEE SEMI-THERM SYMPOSIUM, 11., 1995. **Proceedings...** IEEE, 1995.

MESEGUER, J.; PÉREZ-GRANDE, I.; SANZ-ANDRÉS, A. **Spacecraft thermal control**. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. 412p.

MOMENTIVE PERFORMANCE MATERIALS. **Momentive products**.

Disponível em: <https://www.momentive.com>. Acesso em: 03 fev. 2018.

RUIZ, J. R.; GARRISON, M.; MARTINS, M.; BAKER, C. Thermal interface comparisons under flight-like conditions. In: SPACECRAFT THERMAL CONTROL WORKSHOP, 2008, El Segundo-CA. **Proceedings...** 2008.

SCIALDONE, J. J.; CLATTERBUCK, C. H.; WALL, J. L. **Thermal conductance of two interface materials and their applications in space systems**.

Washington: NASA, 1992. (NASA-TM-104554).

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960p.

SUREPURE. **Surepure products**. Disponível em: <https://www.surepure.com>. Acesso em: 15 fev. 2018.

STEINHART, J. S.; HART, S. R. Calibration curves for thermistors. **Deep-Sea Research**, v.15, p. 497-503, 1968.

YEH, C. L.; WEN, C. Y.; CHEN, Y. F.; YEH, C. H.; WU, C. H. An experimental investigation of thermal contact conductance across bolted joints. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 25, p. 349-357, 2001.

WELCH, J. W.; RUTTER, L. E. An experimental and computational analysis of the thermal interface filler material calgraph. In: AIAA THERMOPHYSICS CONFERENCE, 24., 1989, Buffalo, New York. **Proceedings...** 1989.

WIKIPEDIA. **Coordinate descent**. Disponível em:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate\\_descent](https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate_descent). Acesso em: 20 abr. 2018.



## APÊNDICE A – DETALHES DO APARATO DE TESTE

### A.1 Termistores

A localização dos termistores, assim como dos termopares adicionais nos *dummies*, é mostrada em Figura A.1 a Figura A.5.

Figura A.1 - Localização dos termistores e termopares do D1 (vista superior – *dummy*)

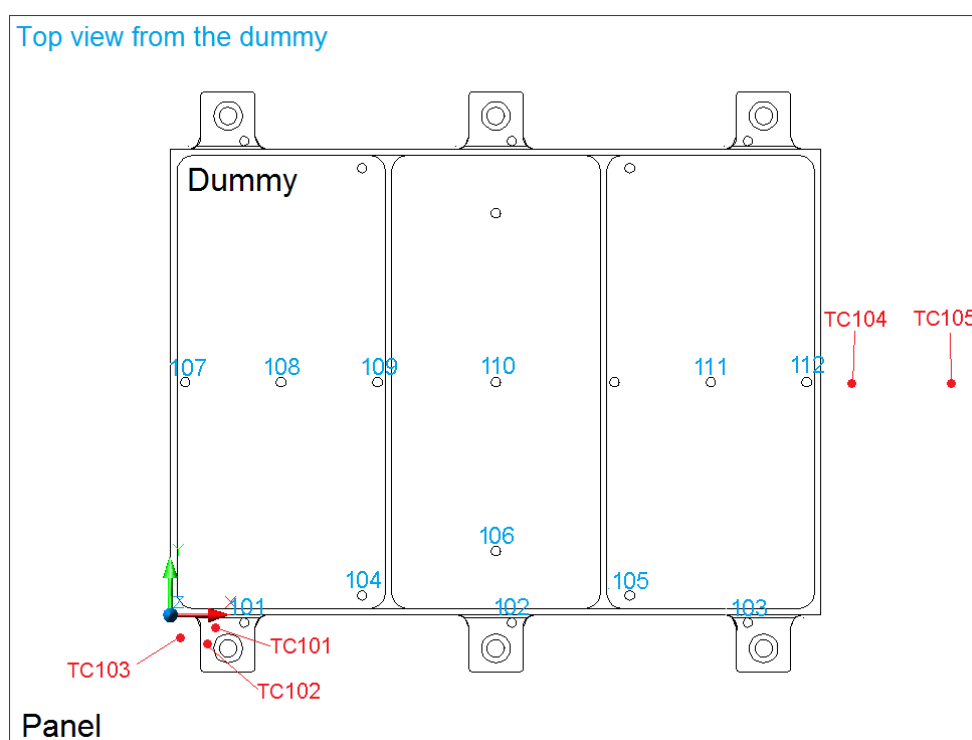


Figura A.2 - Localização dos termistores e termopares do D2 (vista superior – *dummy*)

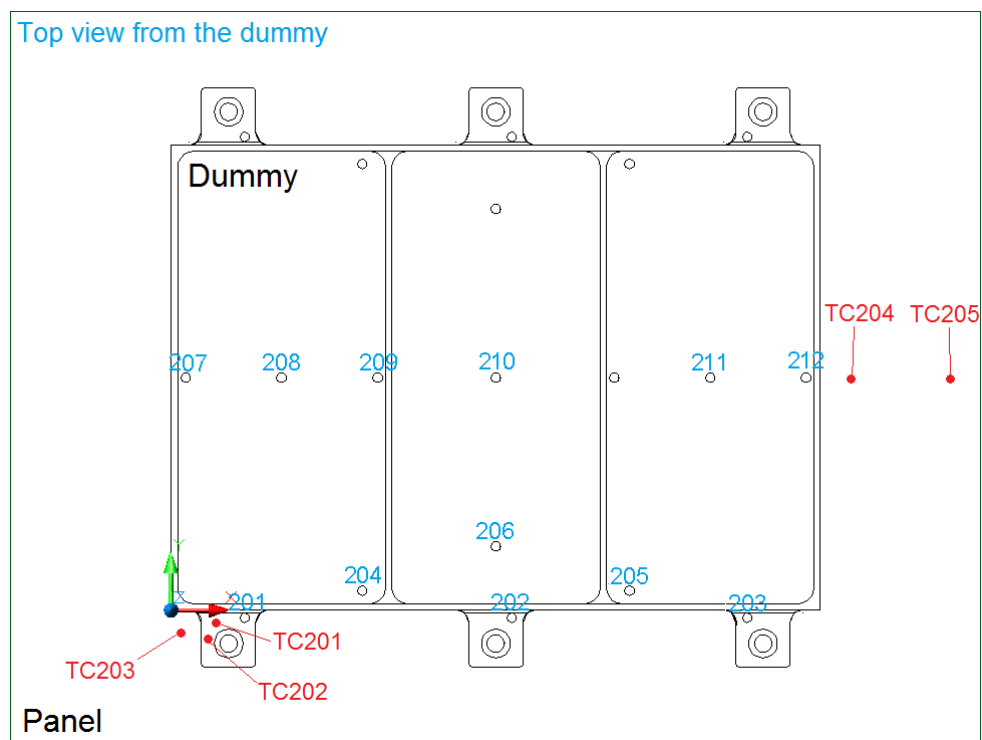


Figura A.3 - Localização dos termistores e termopares do D3 (vista superior – dummy)

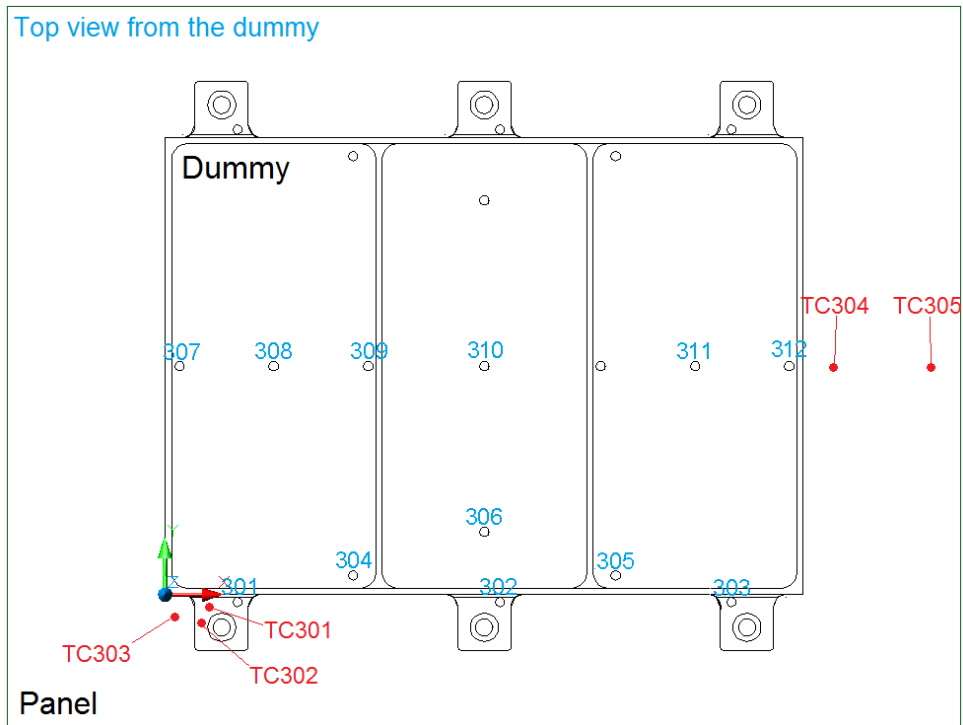


Figura A.4 - Localização dos termistores e termopares do D4 (vista superior – dummy)

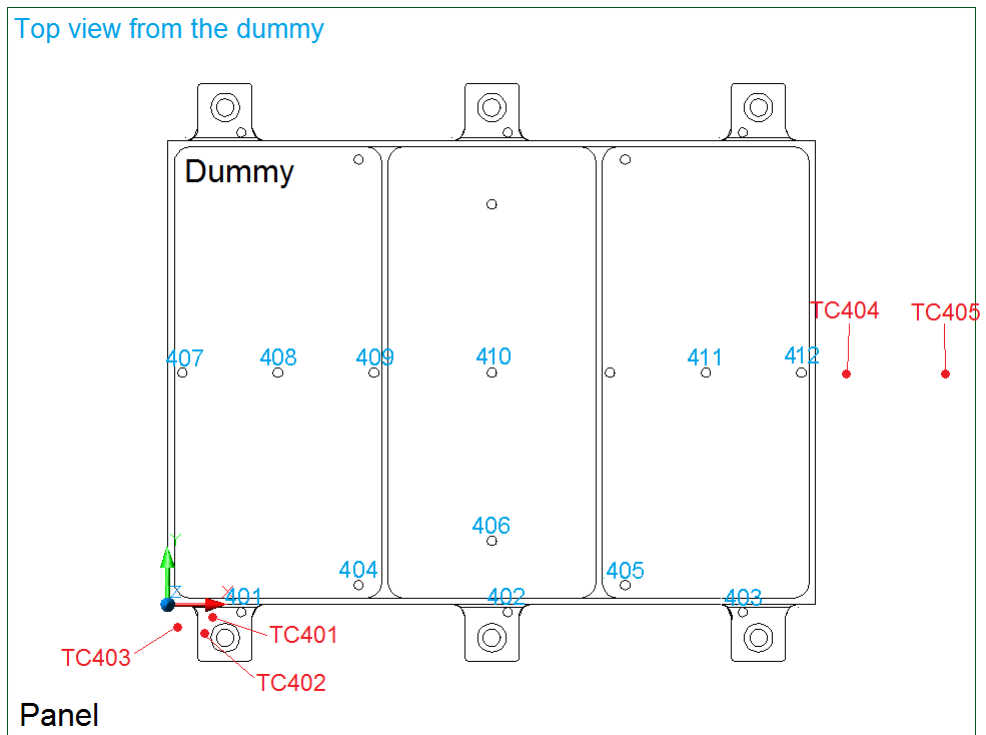
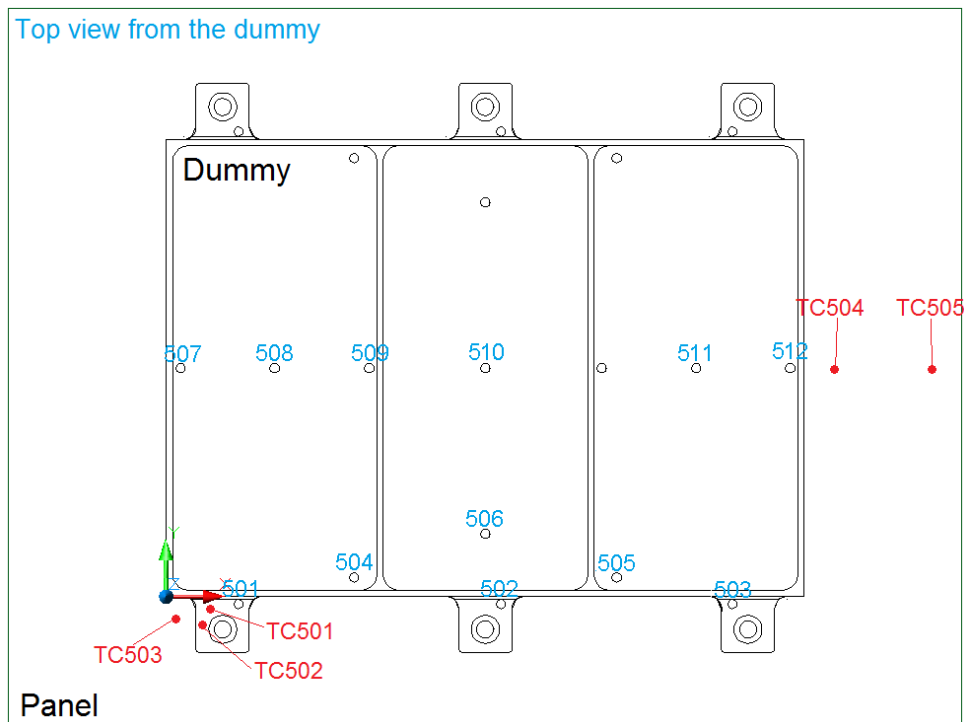


Figura A.5 - Localização dos termistores e termopares do D5 (vista superior – dummy)



Os termistores e termopares instalados nos painéis são mostrados de Figura A.6 a Figura A.10.

Figura A.6 - Localização dos termistores e termopares do P1 (vista inferior – radiador)

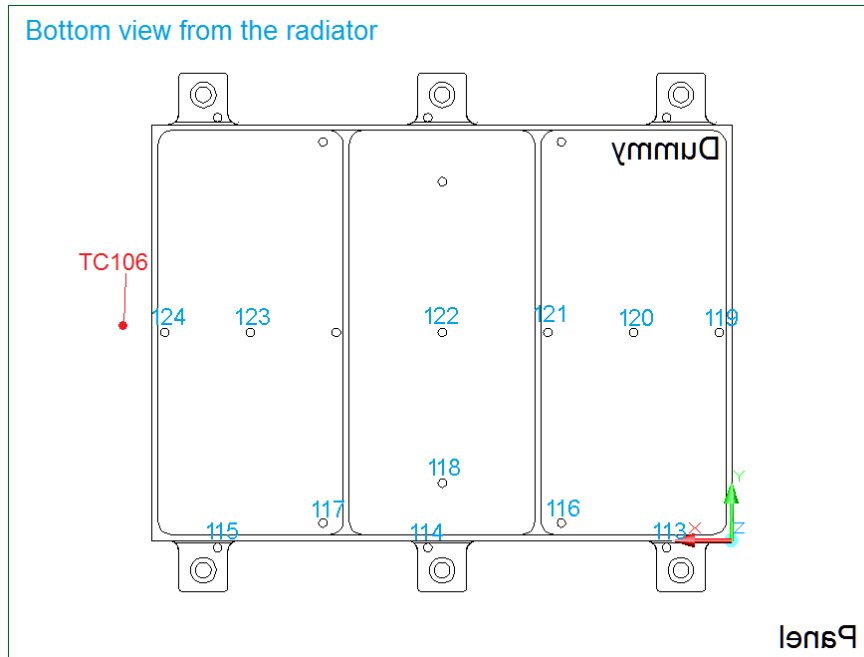


Figura A.7 - Localização dos termistores e termopares do P2 (vista inferior – radiador)

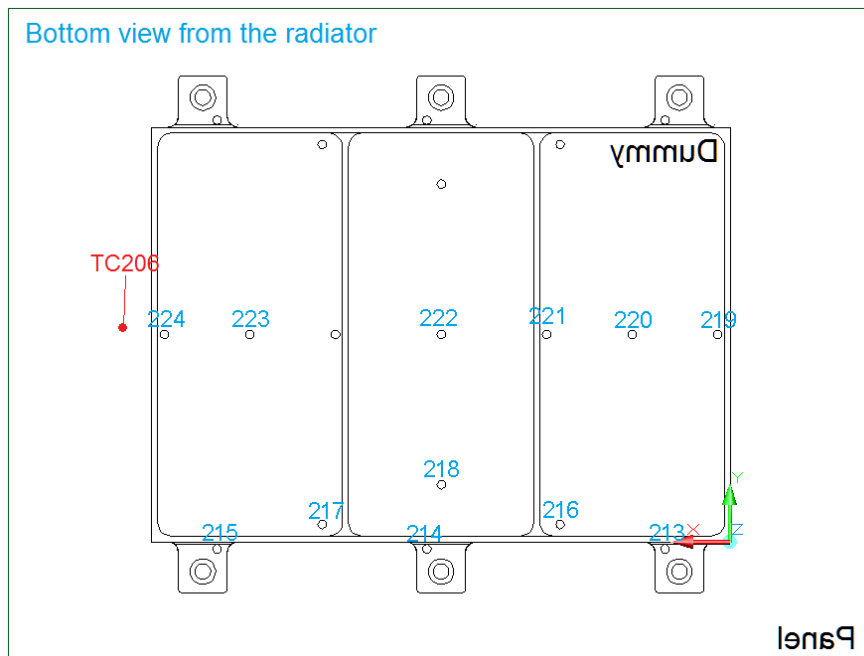


Figura A.8 - Localização dos termistores e termopares do P3 (vista inferior – radiador)

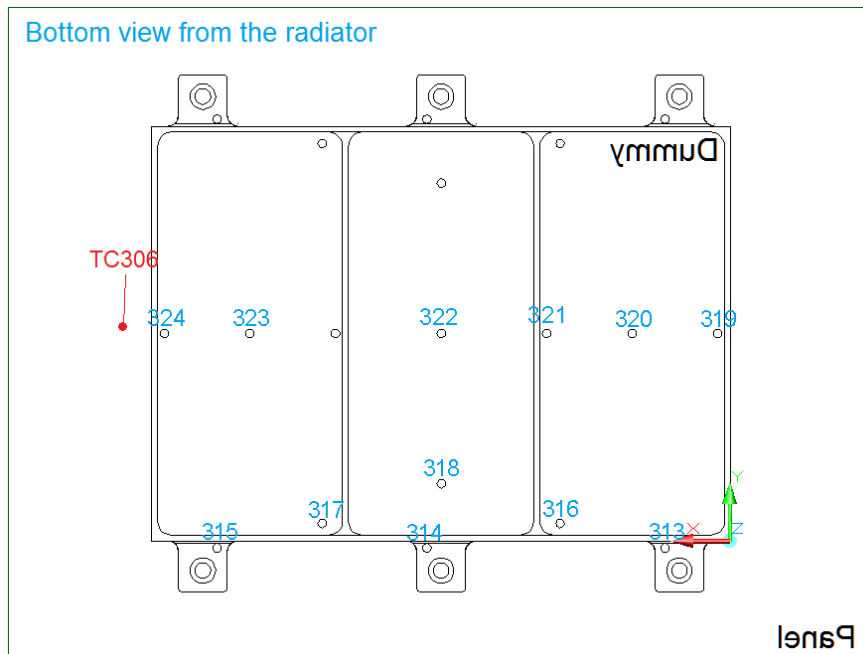


Figura A.9 - Localização dos termistores e termopares do P4 (vista inferior – radiador)

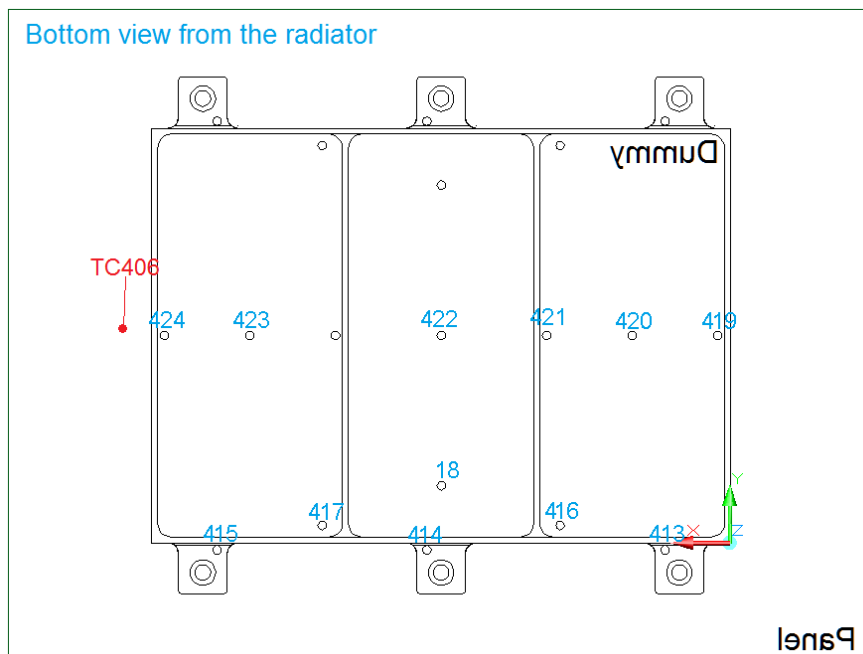
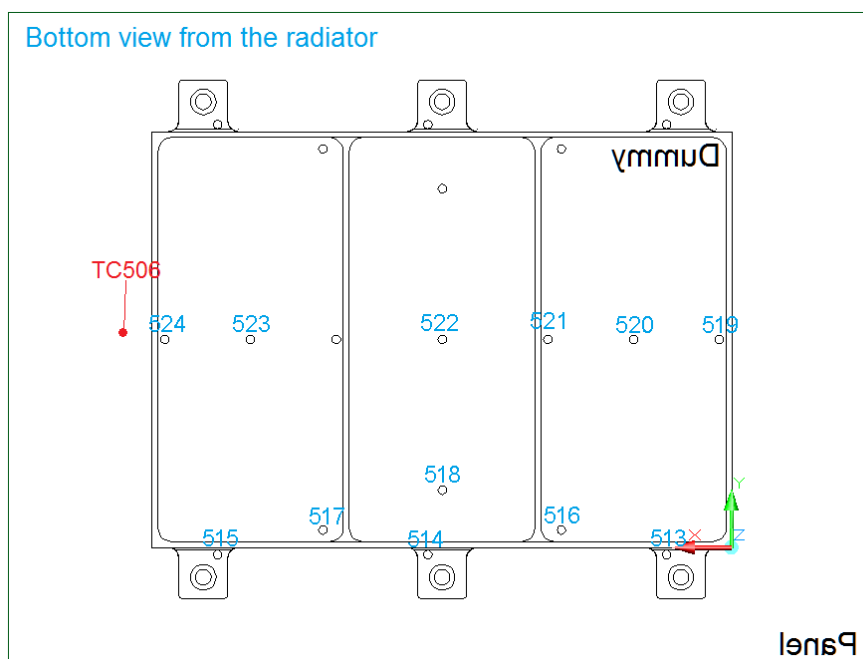


Figura A.10 - Localização dos termistores e termopares do P5 (vista inferior – radiador)



## A.2 Termopares

Além dos termistores, termopares do tipo T *Omega AWG26* adicionais foram instalados para prover mais informações para o tratamento dos dados como condutância do painel de *honeycomb* e eficiência das mantas MLI externas. A descrição dos termopares usados é mostrada da Tabela A.1 a Tabela A.5. O posicionamento dos termopares é descrito na Tabela A.1 à Figura A.10.

Tabela A.1 – Termopares do par Dummy1/Painel1

Termopar	Posição	Função
TC101	Pé do dummy	TRP (principal)
TC102	Pé do dummy	TRP (redundante)
TC103	<i>Facesheet</i> interno	RTC do dummy-painel
TC104	<i>Facesheet</i> interno	$k_{\text{eff}}$ do painel
TC105	<i>Facesheet</i> interno	$k_{\text{eff}}$ do painel
TC106	<i>Facesheet</i> externo (radiador)	$k_{\text{eff}}$ do painel

Tabela A.2 - Termopares do par Dummy2/Painel2

<b>Termopar</b>	<b>Posição</b>	<b>Função</b>
TC201	Pé do dummy	TRP (principal)
TC202	Pé do dummy	TRP (redundante)
TC203	<i>Facesheet</i> interno	RTC do dummy-painel
TC204	<i>Facesheet</i> interno	$k_{eff}$ do painel
TC205	<i>Facesheet</i> interno	$k_{eff}$ do painel
TC206	<i>Facesheet</i> externo (radiador)	$k_{eff}$ do painel

Tabela A.3 - Termopares do par Dummy3/Painel5

<b>Termopar</b>	<b>Posição</b>	<b>Função</b>
TC301	Pé do dummy	TRP (principal)
TC302	Pé do dummy	TRP (redundante)
TC303	<i>Facesheet</i> interno	RTC do dummy-painel
TC304	<i>Facesheet</i> interno	$k_{eff}$ do painel
TC305	<i>Facesheet</i> interno	$k_{eff}$ do painel
TC306	<i>Facesheet</i> externo (radiador)	$k_{eff}$ do painel

Tabela A.4 - Termopares do par Dummy4/Painel3

<b>Termopar</b>	<b>Posição</b>	<b>Função</b>
TC401	Pé do dummy	TRP (principal)
TC402	Pé do dummy	TRP (redundante)
TC403	<i>Facesheet</i> interno	RTC do dummy-painel
TC404	<i>Facesheet</i> interno	$k_{eff}$ do painel
TC405	<i>Facesheet</i> interno	$k_{eff}$ do painel
TC406	<i>Facesheet</i> externo (radiador)	$k_{eff}$ do painel

Tabela A.5 - Termopares do par Dummy5/Painel4

<b>Termopar</b>	<b>Posição</b>	<b>Função</b>
TC501	Pé do dummy	TRP (principal)
TC502	Pé do dummy	TRP (redundante)
TC503	<i>Facesheet</i> interno	RTC do dummy-painel
TC504	<i>Facesheet</i> interno	$k_{eff}$ do painel
TC505	<i>Facesheet</i> interno	$k_{eff}$ do painel
TC506	<i>Facesheet</i> externo (radiador)	$k_{eff}$ do painel

Termopares adicionais são instalados nas mantas MLI que fecham a estrutura do experimento, TC1001, TC1002, TC1003 e TC1004.



### A.3 Conectores

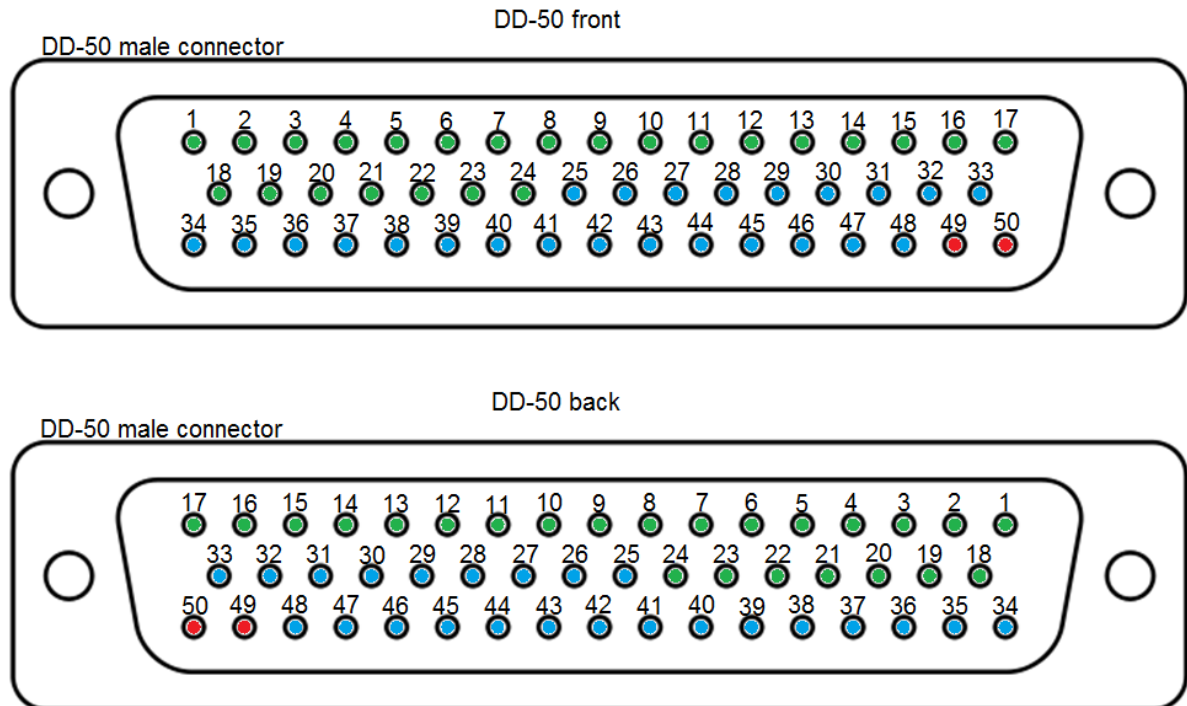
O experimento possui 120 termistores, cujos cabos estão divididos em cinco diferentes conectores do tipo *D-subminiature* DD-50 com pinos macho, qualificados para uso em vácuo, já os termopares possuem conectores independentes, assim como os três circuitos de aquecedores. Cada conector acomoda pinos referentes aos termistores de um conjunto *dummy*/painel, de acordo com a Tabela A.6.

Tabela A.6 – Descrição de cada conector

Conector	Termistores ( <i>dummy</i> )	Termistores (painel)
D1/P1	101-112	113-124
D2/P2	201-212	213-224
D3/P5	301-312	513-524
D4/P3	401-412	313-324
D5/P4	501-512	413-424

A Figura A.11 mostra um esquema com a distribuição dos pinos dos conectores DD-50 usados no experimento. Os pinos em cor verde são usados pelos termistores dos *dummies*, os pinos em cor azul são usados pelos termistores dos painéis e os pinos em cor vermelha não são usados.

Figura A.11 – Esquema de pinos dos conectores DD-50 (macho)



A Tabela A.7 apresenta a descrição de cada um dos pinos dos 5 conectores DD-50 usados no experimento e seus termistores correspondentes. Os pinos mascados na tabela em cor verdes estão nos *dummies* e os azuis nos painéis.

Tabela A.7 – Identificação dos pinos dos conectores

Conjunto D1/P1		Conjunto D2/P2		Conjunto D3/P5		Conjunto D4/P3		Conjunto D5/P4	
Pino	D1 TM	Pino	D2 TM	Pino	D3 TM	Pino	D4 TM	Pino	D5 TM
1	101	1	201	1	301	1	401	1	501
2	101	2	201	2	301	2	401	2	501
3	102	3	202	3	302	3	402	3	502
4	102	4	202	4	302	4	402	4	502
5	103	5	203	5	303	5	403	5	503
6	103	6	203	6	303	6	403	6	503
7	104	7	204	7	304	7	404	7	504
8	104	8	204	8	304	8	404	8	504
9	105	9	205	9	305	9	405	9	505
10	105	10	205	10	305	10	405	10	505
11	106	11	206	11	306	11	406	11	506
12	106	12	206	12	306	12	406	12	506
13	107	13	207	13	307	13	407	13	507
14	107	14	207	14	307	14	407	14	507
15	108	15	208	15	308	15	408	15	508
16	108	16	208	16	308	16	408	16	508
17	109	18	209	18	309	18	409	18	509
18	109	19	209	19	309	19	409	19	509
19	110	20	210	20	310	20	410	20	510
20	110	21	210	21	310	21	410	21	510
21	111	22	211	22	311	22	411	22	511
22	111	23	211	23	311	23	411	23	511
23	112	24	212	24	312	24	412	24	512
24	112	24	212	24	312	24	412	24	512
25	113	26	213	26	513	26	313	26	413
26	113	27	213	27	513	27	313	27	413
27	114	28	214	28	514	28	314	28	414
28	114	29	214	29	514	29	314	29	414
29	115	30	215	30	515	30	315	30	415
30	115	31	215	31	515	31	315	31	415
31	116	32	216	32	516	32	316	32	416
32	116	33	216	33	516	33	316	33	416
33	117	34	217	34	517	34	317	34	417
34	117	35	217	35	517	35	317	35	417
35	118	36	218	36	518	36	318	36	418
36	118	37	218	37	518	37	318	37	418
37	119	38	219	38	519	38	319	38	419
38	119	39	219	39	519	39	319	39	419
39	120	40	220	40	520	40	320	40	420
40	120	41	220	41	520	41	320	41	420
41	121	42	221	42	521	42	321	42	421
42	121	43	221	43	521	43	321	43	421
43	122	44	222	44	522	44	322	44	422

continua

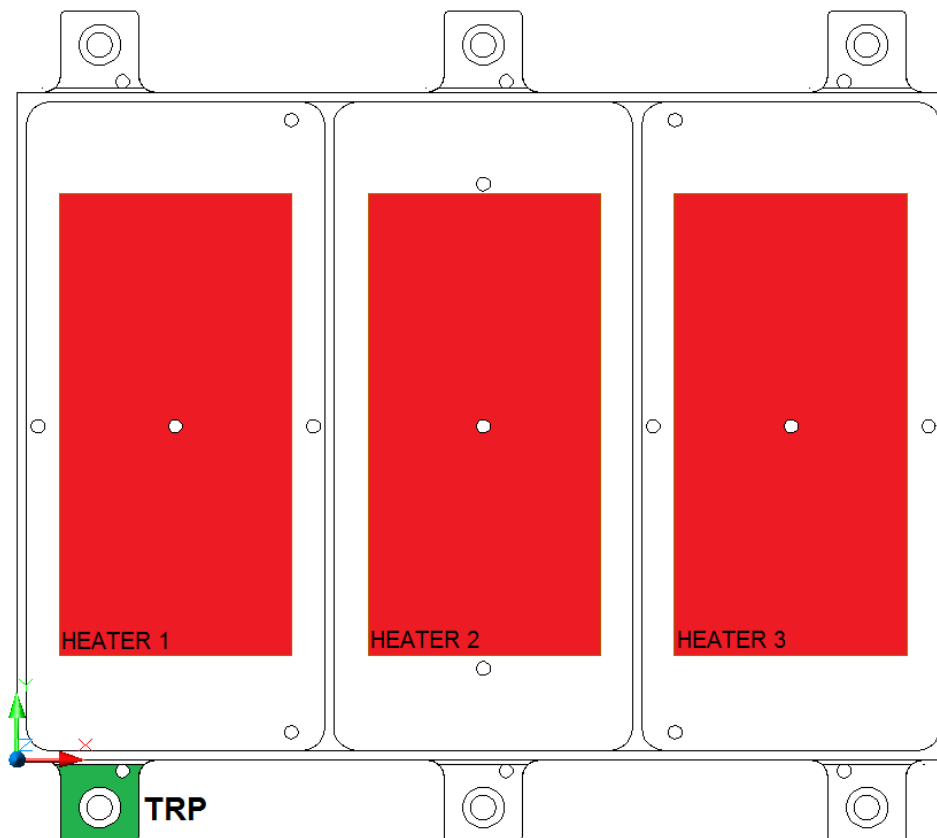
Tabela A.7 - Conclusão

44	122	45	222	45	522	45	322	45	422
45	123	46	223	46	523	46	323	46	423
46	123	47	223	47	523	47	323	47	423
47	124	48	224	48	524	48	324	48	424
48	124	49	224	49	524	49	324	49	424
49	XXX	49	XXX	49	XXX	49	XXX	49	XXX
50	XXX	50	XXX	50	XXX	50	XXX	50	XXX

#### A.4 Aquecedores (*heaters*)

Os aquecedores são do tipo *MINCO® HK5422R4.8L12E Kapton® foil heater* com resistência elétrica nominal de  $4.8 \Omega$  e fios de bitola 24 AWG, Figura A.12.

Figura A.12 – Distribuição dos aquecedores na base do *dummy*



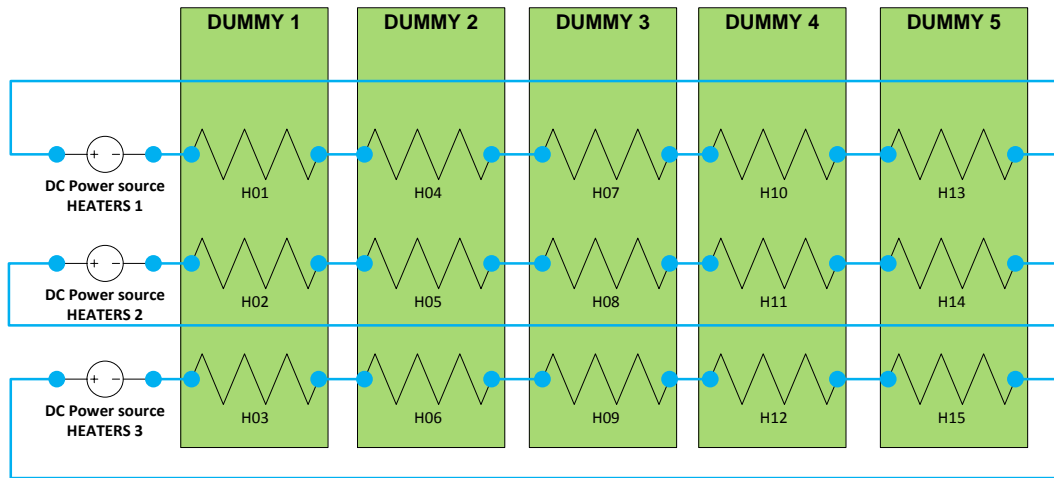
A descrição, localização e resistência medida de cada um dos heaters é apresentada na Tabela A.8.

Tabela A.8 – Descrição e medidas dos *heaters* do experimento

Número	ID do aquecedor	Resistência nominal ( $\Omega$ )	Resistência medida ( $\Omega$ )	Dimensões (mm)
01	H1D1	4,80	5,08	102 x 51
02	H2D1	4,80	5,08	102 x 51
03	H3D1	4,80	5,09	102 x 51
04	H1D2	4,80	5,10	102 x 51
05	H2D2	4,80	5,08	102 x 51
06	H3D2	4,80	5,09	102 x 51
07	H1D3	4,80	5,12	102 x 51
08	H2D3	4,80	5,13	102 x 51
09	H3D3	4,80	5,08	102 x 51
10	H1D4	4,80	5,12	102 x 51
11	H2D4	4,80	5,10	102 x 51
12	H3D4	4,80	5,06	102 x 51
13	H1D5	4,80	5,08	102 x 51
14	H2D5	4,80	5,10	102 x 51
15	H3D5	4,80	5,06	102 x 51

Os aquecedores foram distribuídos e os circuitos ligados a fim de formar apenas três circuitos, Figura 5.17.

Figura A.13 – Circuitos elétricos dos heaters



A Tabela A.9 mostra a descrição da localização dos aquecedores e a resistência elétrica equivalente de cada um dos três circuitos.

Tabela A.9 – Identificação dos heaters e circuitos

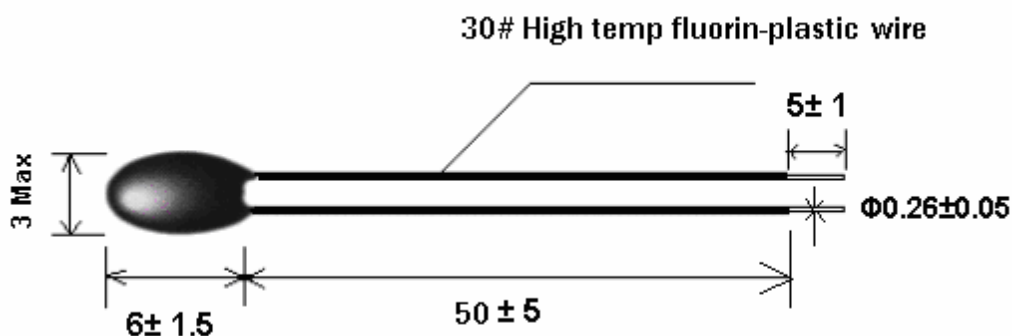
Fonte de alimentação	Heaters (bare)	Heaters (eGRaf)	Heaters (índio)	Heaters (graxa)	Heaters (RTV566)	Resistência equivalente ( $\Omega$ )
PSU1	H1D1	H1D2	H1D3	H1D4	H1D5	25.50
PSU2	H2D1	H2D2	H2D3	H2D4	H2D5	25.49
PSU3	H3D1	H3D2	H3D3	H3D4	H3D5	25.38

## APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DOS TERMISTORES E ANÁLISE DE INCERTEZAS

### B.1 Correção Individual dos Termistores

Todos os 120 sensores de temperatura utilizados são termistores do fabricante *Nanjing Shiheng Electronics Co.*, modelo *MD52 pearl-shape NTC R10 K $\Omega$  @ 25 °C*. A Figura B.1 mostra detalhes construtivos do termistor.

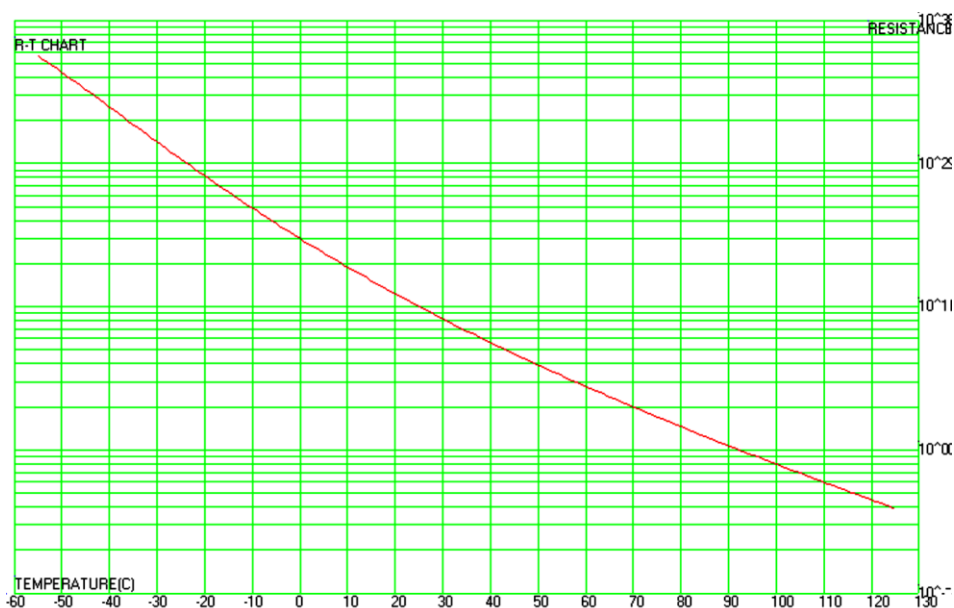
Figura B.1 – Descrição geométrica do termistor utilizado



Fonte: Datasheet MF52 Pearl-Shape Temp Measurement NTC Thermistor

Como se trata de um sensor NTC (*Negative Temperature Coefficient*), a sua resistência elétrica varia de acordo com sua temperatura de forma inversa, ou seja, com o aumento da temperatura a resistência diminui. Esta variação se comporta de maneira exponencial, com mostrado no gráfico típico com escala logarítmica da Figura B.2.

Figura B.2 – Curva típica média de variação da resistência x temperatura



Fonte: Datasheet MF52 Pearl-Shape Temp Measurement NTC Thermistor

Porém, existem diferenças intrínsecas nesta curva para cada sensor. A ideia é identificar cada uma dessas curvas para minimizar a incerteza na medida das temperaturas do teste.

Foi solicitado ao INPE/LIT o serviço de levantamento das resistências elétricas de todos os termistores em 6 diferentes temperaturas no intervalo de -20 a +55 °C (-20, 0, +10, +25, +40, +55 °C).

Foi realizada a calibração por comparação ao Termômetro de Resistência de Platina Padrão. Para tanto, todos os sensores foram posicionados em um bloco perfurado de cobre junto com o termômetro padrão para assumir que possuíam a mesma temperatura no momento das medidas e os 6 níveis de temperatura foram alcançados dentro de uma câmara térmica.

As medidas de resistência elétrica do padrão foram realizadas pelo método potenciométrico com corrente contínua de 1 mA. As medidas de resistência elétrica dos termistores foram obtidas pelo método direto a dois fios e com corrente contínua de 100 µA. Foram realizadas 25 medições para cada ponto de calibração, sendo considerada a média com seu desvio padrão. Cada



termistor recebeu um certificado de calibração e os dados brutos foram disponibilizados.

Equipamentos utilizados:

- Termômetro de Resistência de Platina, 25  $\Omega$  a 0 °C Rosemount 162CE
- Multímetro digital Solartron 7081
- Sistema de aquisição de dados Agilent 34970A
- Câmara térmica Delta Design 9064

Para termistores desse tipo, a equação de Steinhart Equação B.1, com temperatura em Kelvin, é a que melhor ajusta o comportamento da temperatura em função da resistência elétrica.

$$T^{-1} = C_1 + C_2 \ln R + C_3 (\ln R)^3 \quad (\text{B.1})$$

Sendo assim, tal equação foi utilizada para fazer o ajuste da curva de cada um dos termistores utilizando o programa *Origin 6.0* e levantar os valores das constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ . Os valores das constantes obtidos para todos os termistores utilizados no teste são apresentados na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Constantes dos termistores

ID do Termistor	$C_1$	$C_2$	$C_3$	Localização
101	0.00129	2.08E-04	1.97E-07	Dummy 1
102	0.00129	2.07E-04	1.99E-07	Dummy 1
103	0.00129	2.08E-04	1.97E-07	Dummy 1
104	0.00127	2.11E-04	1.83E-07	Dummy 1
105	0.00130	2.06E-04	2.04E-07	Dummy 1
106	0.00126	2.12E-04	1.86E-07	Dummy 1
107	0.00126	2.12E-04	1.85E-07	Dummy 1
108	0.00126	2.11E-04	1.89E-07	Dummy 1

continua

Tabela B.1 – Continuação

109	0.00126	2.11E-04	1.87E-07	<i>Dummy 1</i>
110	0.00125	2.13E-04	1.81E-07	<i>Dummy 1</i>
111	0.00123	2.16E-04	1.68E-07	<i>Dummy 1</i>
112	0.00119	2.22E-04	1.49E-07	<i>Dummy 1</i>
113	0.00119	2.22E-04	1.47E-07	Painel 1
114	0.00111	2.34E-04	1.08E-07	Painel 1
115	0.00110	2.36E-04	1.00E-07	Painel 1
116	0.00129	2.08E-04	1.94E-07	Painel 1
117	0.00129	2.07E-04	1.97E-07	Painel 1
118	0.00128	2.09E-04	1.91E-07	Painel 1
119	0.00130	2.06E-04	2.03E-07	Painel 1
120	0.00130	2.07E-04	1.99E-07	Painel 1
121	0.00130	2.03E-04	2.22E-07	Painel 1
122	0.00129	2.07E-04	2.07E-07	Painel 1
123	0.00131	2.02E-04	2.25E-07	Painel 1
124	0.00128	2.07E-04	2.09E-07	Painel 1
201	0.00129	2.05E-04	2.17E-07	<i>Dummy 2</i>
202	0.00129	2.05E-04	2.19E-07	<i>Dummy 2</i>
203	0.00130	2.05E-04	2.16E-07	<i>Dummy 2</i>
204	0.00129	2.06E-04	2.09E-07	<i>Dummy 2</i>
205	0.00128	2.08E-04	2.04E-07	<i>Dummy 2</i>
206	0.00130	2.04E-04	2.20E-07	<i>Dummy 2</i>
207	0.00132	2.01E-04	2.31E-07	<i>Dummy 2</i>
208	0.00129	2.06E-04	2.13E-07	<i>Dummy 2</i>
209	0.00131	2.02E-04	2.28E-07	<i>Dummy 2</i>
210	0.00127	2.09E-04	2.00E-07	<i>Dummy 2</i>
211	0.00130	2.04E-04	2.20E-07	<i>Dummy 2</i>
212	0.00128	2.07E-04	2.10E-07	<i>Dummy 2</i>
213	0.00129	2.05E-04	2.13E-07	Painel 2
214	0.00130	2.03E-04	2.24E-07	Painel 2
215	0.00132	2.01E-04	2.34E-07	Painel 2
216	0.00132	2.00E-04	2.36E-07	Painel 2
217	0.00128	2.08E-04	2.09E-07	Painel 2
218	0.00130	2.05E-04	2.20E-07	Painel 2
219	0.00135	1.96E-04	2.48E-07	Painel 2
220	0.00129	2.06E-04	2.16E-07	Painel 2
221	0.00128	2.06E-04	2.14E-07	Painel 2
222	0.00128	2.07E-04	2.08E-07	Painel 2
223	0.00130	2.04E-04	2.25E-07	Painel 2
224	0.00129	2.07E-04	2.10E-07	Painel 2
301	0.00127	2.09E-04	2.01E-07	<i>Dummy 3</i>
302	0.00126	2.11E-04	1.96E-07	<i>Dummy 3</i>

continua

Tabela B.1 - Continuação

303	0.00125	2.12E-04	1.93E-07	<i>Dummy 3</i>
304	0.00125	2.12E-04	1.95E-07	<i>Dummy 3</i>
305	0.00124	2.14E-04	1.88E-07	<i>Dummy 3</i>
306	0.00125	2.11E-04	1.96E-07	<i>Dummy 3</i>
307	0.00126	2.11E-04	1.99E-07	<i>Dummy 3</i>
308	0.00128	2.08E-04	2.01E-07	<i>Dummy 3</i>
309	0.00123	2.14E-04	1.86E-07	<i>Dummy 3</i>
310	0.00124	2.12E-04	2.00E-07	<i>Dummy 3</i>
311	0.00122	2.17E-04	1.74E-07	<i>Dummy 3</i>
312	0.00126	2.09E-04	2.07E-07	<i>Dummy 3</i>
313	0.00124	2.12E-04	2.02E-07	Painel 3
314	0.00125	2.12E-04	1.89E-07	Painel 3
315	0.00122	2.17E-04	1.73E-07	Painel 3
316	0.00123	2.15E-04	1.79E-07	Painel 3
317	0.00122	2.16E-04	1.81E-07	Painel 3
318	0.00124	2.14E-04	1.82E-07	Painel 3
319	0.00127	2.08E-04	2.07E-07	Painel 3
320	0.00125	2.12E-04	1.95E-07	Painel 3
321	0.00126	2.09E-04	2.10E-07	Painel 3
322	0.00130	2.04E-04	2.23E-07	Painel 3
323	0.00126	2.10E-04	2.07E-07	Painel 3
324	0.00116	2.29E-04	1.21E-07	Painel 3
401	0.00127	2.08E-04	2.13E-07	<i>Dummy 4</i>
402	0.00118	2.22E-04	1.60E-07	<i>Dummy 4</i>
403	0.00124	2.13E-04	1.90E-07	<i>Dummy 4</i>
404	0.00123	2.14E-04	1.83E-07	<i>Dummy 4</i>
405	0.00120	2.20E-04	1.64E-07	<i>Dummy 4</i>
406	0.00123	2.15E-04	1.85E-07	<i>Dummy 4</i>
407	0.00125	2.12E-04	1.93E-07	<i>Dummy 4</i>
408	0.00124	2.14E-04	1.83E-07	<i>Dummy 4</i>
409	0.00127	2.10E-04	1.87E-07	<i>Dummy 4</i>
410	0.00127	2.10E-04	1.85E-07	<i>Dummy 4</i>
411	0.00128	2.09E-04	1.90E-07	<i>Dummy 4</i>
412	0.00127	2.10E-04	1.85E-07	<i>Dummy 4</i>
413	0.00129	2.09E-04	1.89E-07	Painel 4
414	0.00128	2.09E-04	1.91E-07	Painel 4
415	0.00128	2.09E-04	1.91E-07	Painel 4
416	0.00127	2.10E-04	1.88E-07	Painel 4
417	0.00127	2.08E-04	2.02E-07	Painel 4
418	0.00122	2.17E-04	1.76E-07	Painel 4
419	0.00121	2.17E-04	1.80E-07	Painel 4
420	0.00128	2.07E-04	2.04E-07	Painel 4

continua

Tabela B.1 - Conclusão

421	0.00115	2.28E-04	1.34E-07	Painel 4
422	0.00114	2.30E-04	1.25E-07	Painel 4
423	0.00116	2.27E-04	1.30E-07	Painel 4
424	0.00113	2.32E-04	1.16E-07	Painel 4
501	0.00115	2.28E-04	1.26E-07	<i>Dummy 5</i>
502	0.00141	1.87E-04	2.80E-07	<i>Dummy 5</i>
503	0.00128	2.09E-04	1.95E-07	<i>Dummy 5</i>
504	0.00121	2.18E-04	1.65E-07	<i>Dummy 5</i>
505	0.00117	2.26E-04	1.38E-07	<i>Dummy 5</i>
506	0.00132	2.02E-04	2.22E-07	<i>Dummy 5</i>
507	0.00118	2.24E-04	1.40E-07	<i>Dummy 5</i>
508	0.00127	2.09E-04	1.94E-07	<i>Dummy 5</i>
509	0.00090	2.69E-04	-2.68E-08	<i>Dummy 5</i>
510	0.00090	2.69E-04	-2.69E-08	<i>Dummy 5</i>
511	0.00089	2.71E-04	-3.08E-08	<i>Dummy 5</i>
512	0.00097	2.58E-04	2.19E-08	<i>Dummy 5</i>
513	0.00091	2.66E-04	-1.36E-08	Painel 5
514	0.00088	2.72E-04	-3.19E-08	Painel 5
515	0.00095	2.59E-04	2.20E-08	Painel 5
516	0.00095	2.60E-04	1.65E-08	Painel 5
517	0.00101	2.50E-04	5.19E-08	Painel 5
518	0.00103	2.47E-04	6.45E-08	Painel 5
519	0.00115	2.28E-04	1.30E-07	Painel 5
520	0.00110	2.36E-04	1.09E-07	Painel 5
521	0.00118	2.26E-04	1.26E-07	Painel 5
522	0.00115	2.29E-04	1.17E-07	Painel 5
523	0.00113	2.34E-04	9.90E-08	Painel 5
524	0.00117	2.25E-04	1.42E-07	Painel 5

Durante o teste, a temperatura dos termistores foi extraída com o uso de um *Agilent Multifunction Switch/Measure Unit 34980A*, o qual possui as constantes com valores  $C_1= 0.00113$ ,  $C_2= 2,34E-4$  e  $C_3= 8.86E-8$ .

Para fazer a correção, inicialmente foi preciso revelar a resistência elétrica equivalente para cada medida feita durante os testes. Para tanto, a Equação B.2 foi utilizada em conjunto com as Equações B.3 e B.4, informadas no manual do usuário do sistema de aquisição de dados *Agilent*.

$$R(\Omega) = \exp\left[(\beta - 0.5\alpha)^{\frac{1}{3}} - (\beta + 0.5\alpha)^{\frac{1}{3}}\right] \quad (\text{B.2})$$

$$\alpha = \frac{\left[C_1 - \left(\frac{1}{T}\right)\right]}{C_3} \quad (\text{B.3})$$

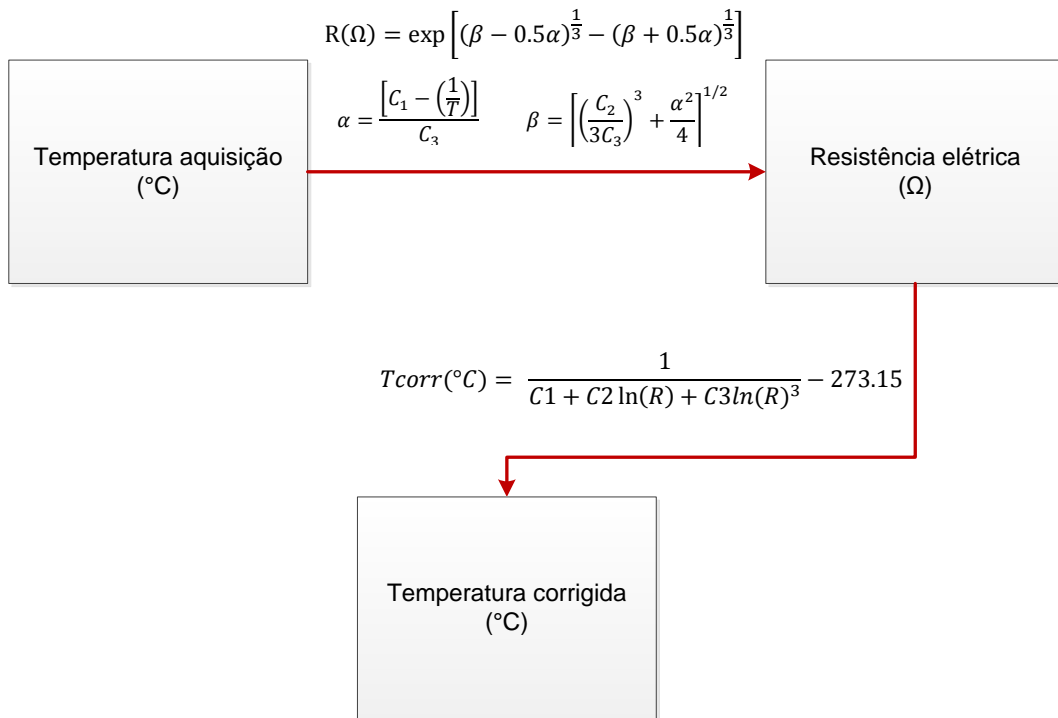
$$\beta = \left[\left(\frac{C_2}{3C_3}\right)^3 + \frac{\alpha^2}{4}\right]^{1/2} \quad (\text{B.4})$$

Com todos os valores de resistência elétrica revelados, é possível corrigir as temperaturas para todas as fases dos testes utilizando a Equação B.5 com as constantes individuais  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  da Tabela B.1.

$$T_{corr}(^{\circ}\text{C}) = \frac{1}{C_1 + C_2 \ln(R) + C_3 \ln(R)^3} - 273.15 \text{ C} \quad (\text{B.5})$$

A Figura B.3 ilustra na forma de fluxograma o processo utilizado para corrigir a temperatura. Foi criada uma planilha em *MS Excel* para automatizar este processo.

Figura B.3 – Fluxograma para correção das temperaturas medidas



Todas as medidas realizadas ao longo dos dois testes foram corrigidas com esta metodologia.

## B.2 Análise de Incertezas

Um método bastante estabelecido para análise de incertezas foi apresentado por Kline e McClintock (1953), chegando na Equação B.6 para cálculo da incerteza do parâmetro R, o qual é função de  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.6})$$

onde:

$w_R$ : incerteza do parâmetro R

$w_{x1}$ : incerteza do parâmetro  $x_1$

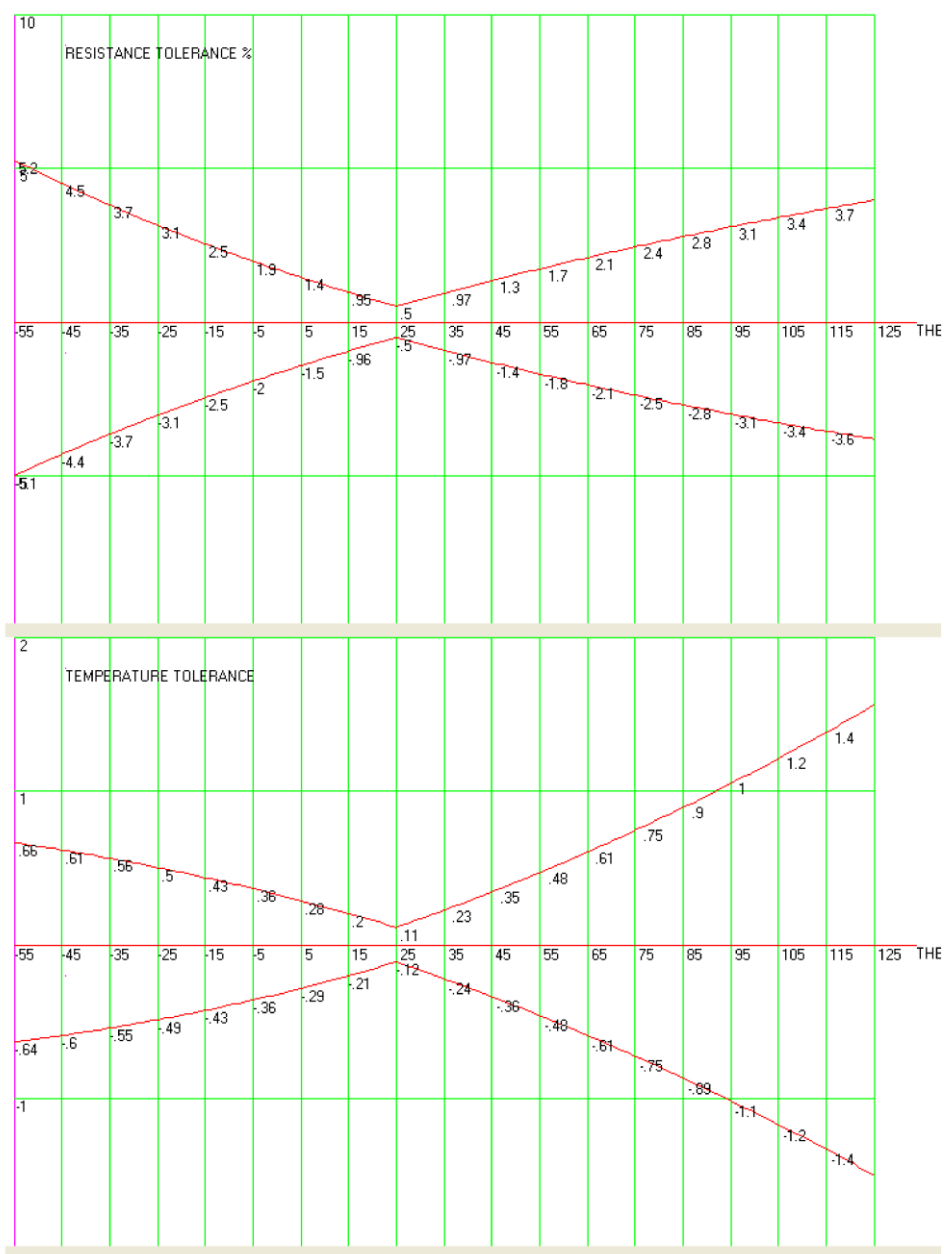
$w_{x2}$ : incerteza do parâmetro  $x_2$

$w_{xn}$ : incerteza do parâmetro  $x_n$

### **B.2.1 Incertezas dos Termistores**

Levando em conta a incerteza dos termistores, segundo *datasheet* do fabricante, para a faixa de temperatura em que o teste ocorreu, a incerteza máxima na resistência nominal típica do sensor é de  $\pm 2\%$ , o que resulta numa incerteza de  $\pm 0,5$  °C, quando se usa a equação padrão com valor de B (25/50) de 3950 K, Figura B.4. Porém, esta incerteza acabou sendo praticamente contornada com o levantamento das resistências e correção das temperaturas.

Figura B.4 – Incertezas de resistência e temperatura dos termistores informada pelo fabricante



Ainda, a incerteza no valor da temperatura dos termistores pode ser calculada levando em conta as incertezas inerentes à calibração do LIT e de leitura das temperaturas pelo sistema de aquisição de dados durante o teste, Equação 18.



A incerteza durante a calibração é de  $w_{CAL} = \pm 0.064$  °C e da aquisição de dados durante os teste é de  $w_{DAS} = \pm 0.060$  °C, ambas para um fator de abrangência  $k=2$ , para uma confiança de 95%. A incerza total para os termistores utilizados no teste é igual a soma das incertezas, ou seja,  $w_{TM} = \pm 0,12$  °C. Esta incerteza vale para todos os termistores, tanto instalados nos *dummies* ( $w_{Td}$ ) como nos painéis ( $w_{Tp}$ ). Assim,  $w_{TM} = w_{Td} = w_{Tp} = \pm 0,12$  °C.

Uma vez que grande parte da análise dos dados será realizada levando em conta a diferença de temperatura  $\Delta T$  entre os sensores correspondentes no *dummy* e painel, calculou-se o valor da incerteza de  $\Delta T$  através da Equação B.7.

$$w_{\Delta T} = \left[ \left( \frac{\partial \Delta T}{\partial T_d} w_{T_d} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta T}{\partial T_p} w_{T_p} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B.7)$$

onde:

$w_{\Delta T}$ : incerteza no valor da diferença de temperatura dos termistores

$w_{Td}$ : incerteza no valor da temperatura do *dummy*

$w_{Tp}$ : incerteza no valor da temperatura do painel

Com a função  $\Delta T = T_d - T_p$ , calcula-se as derivadas parciais em relação a  $T_d$  e  $T_p$ , temos que:

$$w_{\Delta T} = \sqrt{(w_{T_d})^2 + (w_{T_p})^2} \quad (B.8)$$

Portanto, a incerteza sistemática propagada para a diferença de temperatura medida entre os sensores é  $w_{\Delta T} = \pm 0,17$  °C.

Ainda, deve-se considerar as incertezas aleatórias, as quais obedecem a distribuições estatísticas. Para uma confiança de 95%, será utilizado o valor da média e duas vezes o desvio padrão da amostragem ( $2\sigma$ ).

Garcia (2003) apresenta uma metodologia para cálculo da incerteza total numa amostragem, representada pela Equação B.9.

$$w_{TOTAL} = \sqrt{(w_{\Delta T})^2 + (2\sigma)^2} \quad (\text{B.9})$$

### B.2.2 Incertezas dos Aquecedores

Quanto a incerteza na dissipação dos aquecedores, serão levadas em conta a incerteza na medida da tensão e da corrente, de acordo com a Equação B.10.

$$w_P = \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial V} w_V \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial I} w_I \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.10})$$

onde:

$w_P$ : incerteza no valor da potência aplicada nos aquecedores

$w_V$ : incerteza no valor da tensão aplicada nos aquecedores

$w_I$ : incerteza no valor da corrente nos aquecedores

$$P = V \cdot I \quad (\text{B.11})$$

Após a substituição da Equação B.11 na Equação B.10 e manipulações algébricas

$$w_P = [I^2 w_V^2 + V^2 w_I^2]^{1/2} \quad (\text{B.12})$$

De acordo com o certificado de calibração do sistema de aquisição de dados do LIT, a incerteza expandida máxima, com fator de abrangência  $k= 2$  (com 95% de confiança), da tensão é de  $wV= \pm 0,0014$  V e a da corrente é de  $wI= \pm 0.00013$  A.

Assim, é possível calcular a incerteza no valor da potência dissipada nos aquecedores utilizado para correlações no TMM de forma conservativa. Os valores são apresentados na Tabela B.2.

Tabela B.2 – Incerteza da potência expandida propagada para confiança de 95%

Temperatura alvo (°C)	Potência por dummy (W)	Incerteza da potência propagada (W)
-20	14.3	$\pm 0.0060$
0	18.7	$\pm 0.0069$
+20	24.6	$\pm 0.0079$
+45	33.3	$\pm 0.0092$

Para maior precisão nas medidas, estes parâmetros deveriam ser medidos a quatro fios, mas a topologia do espécime de teste dificultava esta abordagem. Porém, a resistência da fiação que alimentou os aquecedores, assim como os conectores foi levantada e considerada na análise e ajuste do TMM com os dados experimentais.

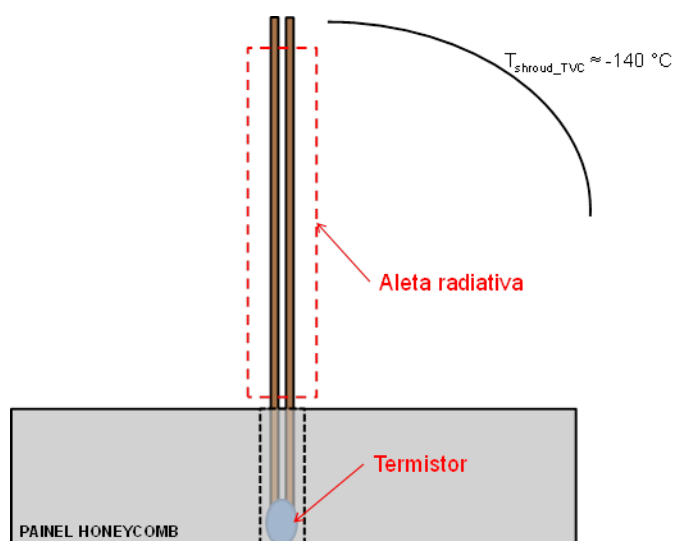
### B.3 Estudo Sobre Influência da Fiação dos Sensores

Um estudo da influência na leitura de temperatura nos sensores que é causada pela exposição da fiação ao ambiente frio da TVC foi realizado e gerou algumas recomendações, tanto no aparato do teste como no tratamento dos dados.

### B.3.1 Fiação Atuando como Aleta Radiativa

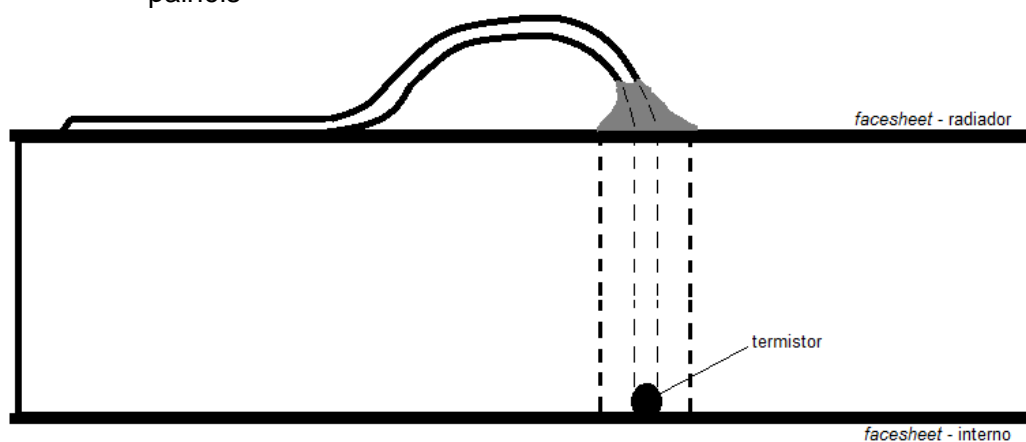
Os cabos de sensores de temperaturas expostos em ambientes com baixa temperatura atuam passivamente como aletas radiativas, extraíndo calor do sensor por condução através dos fios de cobre e causando um erro na leitura da temperatura da região de interesse, a Figura B.5 ilustra o problema de forma esquemática.

Figura B.5 - Fios de um sensor de temperatura atuando como aletas radiativas



O estudo, realizado com combinação de métodos analíticos e modelamento no Thermal Desktop<sup>®</sup> SINDA/FLUINT chega à conclusão de que fazendo um “aterramento” térmico da fiação, conforme mostrado na Figura B.6, este efeito fica reduzido e segundo o estudado pode levar o sensor indicar uma temperatura de 0,4 °C mais baixa, para o caso em que a superfície de interesse está à 55 °C, Costa (2015). Conseqüentemente, isto foi considerado no tratamento dos dados dos testes.

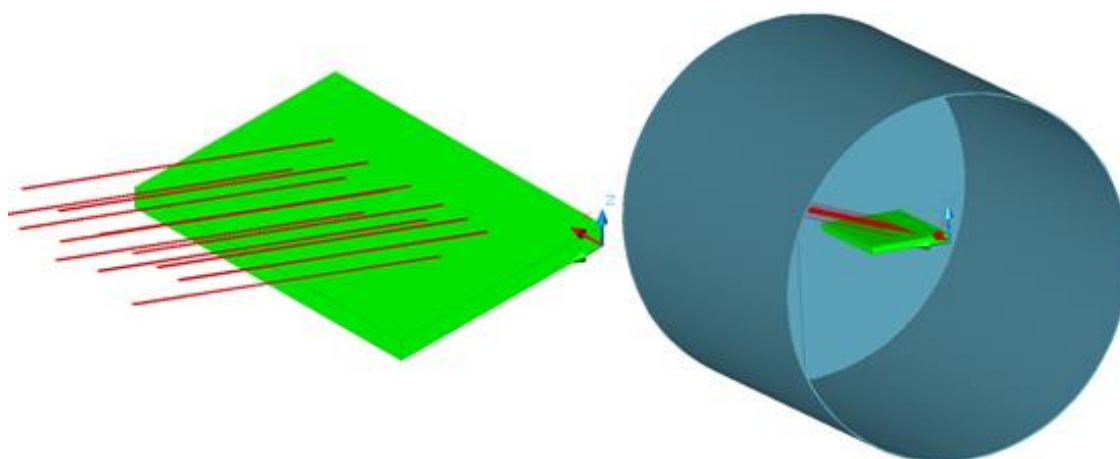
Figura B.6 – Recomendação de aterramento térmico da fiação dos sensores dos painéis



### B.3.2 Bloqueio Causado pela Fiação no Radiador

No estudo realizado, 3 casos com diferentes inclinações da fiação dos termistores foram considerados. O caso em que a fiação cria maior bloqueio entre o radiador e a camisa fria da câmara de vácuo é o que a fiação forma o menor ângulo com o plano do radiador, conforme apresentado na Figura B.7.

Figura B.7 - Fios saindo inclinados, com ângulo de 20° em relação ao painel



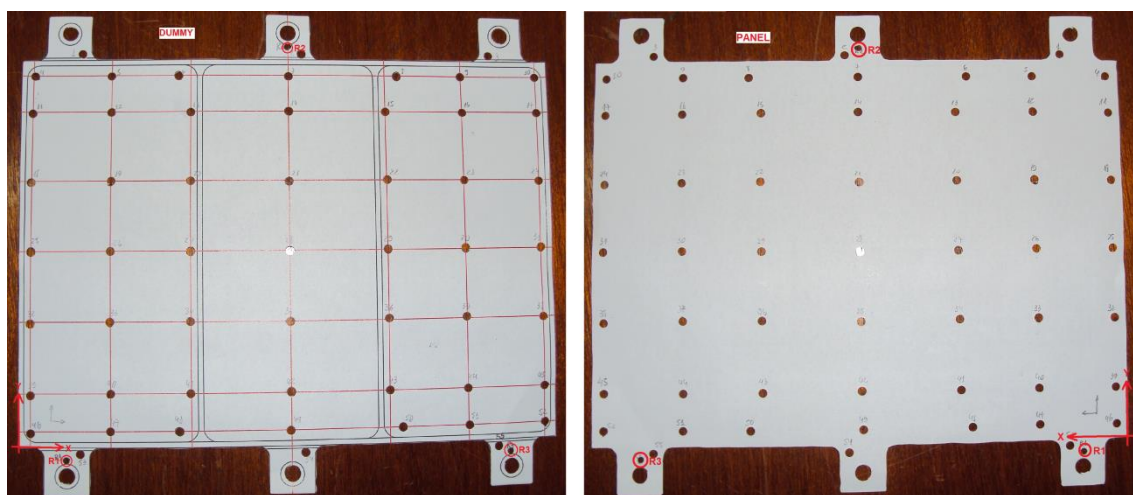
Para esta configuração, o bloqueio causado é de aproximadamente 4,8%, o que é relativamente significativo e foi considerado no TMM detalhado da interface.

## APÊNDICE C – ESTUDO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DAS PEÇAS

### C.1 Mapeamento das Planicidades

Com o objetivo de entender melhor a interface *panel-dummy* e também fazer a escolha dos pares, foi realizado o mapeamento da planicidade em ambas as superfícies. Para isto, foram escolhidos 55 pontos coincidentes nas duas superfícies, incluindo os pontos em que o aparato possui os sensores de temperatura. A Figura C.1 mostra o gabarito utilizado para identificar as posições de medida de planicidade.

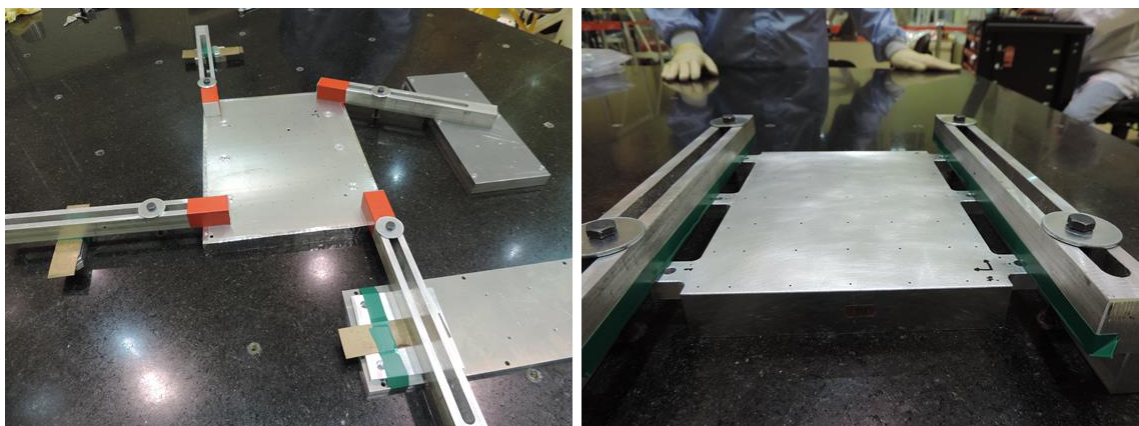
Figura C.1 – Gabarito para posicionamento das medições de planicidade



A as medidas no eixo z foram efetuadas em relação a um plano de referência formado por 3 pontos sobre insertos (R1, R2 e R3), destacados em vermelho na Figura C.1, os quais entram obrigatoriamente em contato no momento da montagem por estarem localizados nos pontos de fixação.

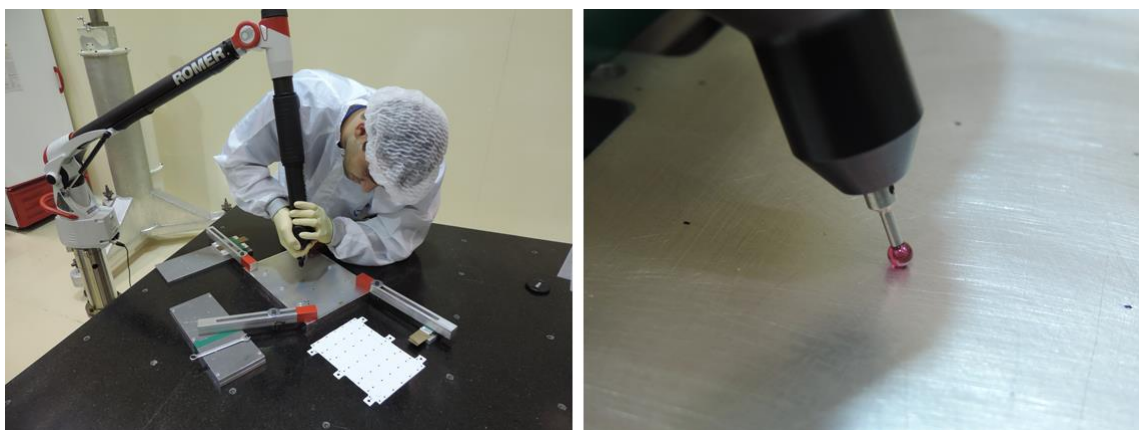
As peças foram presas na superfície de um despenho de granito com o objetivo de minimizar erros com escorregamentos, Figura C.2.

Figura C.2 – Fixação das peças no desempenho de granito



Utilizando o braço de medição francês *ROMER Absolute Arm RA-7525-2 F-41800 Montoire*, foram feitas as medidas no eixo Z de todos os 55 pontos, relativas ao plano definido pelos pontos de referência R1, R2 e R3. A Figura C.3 mostra o operador realizando as medidas na peça.

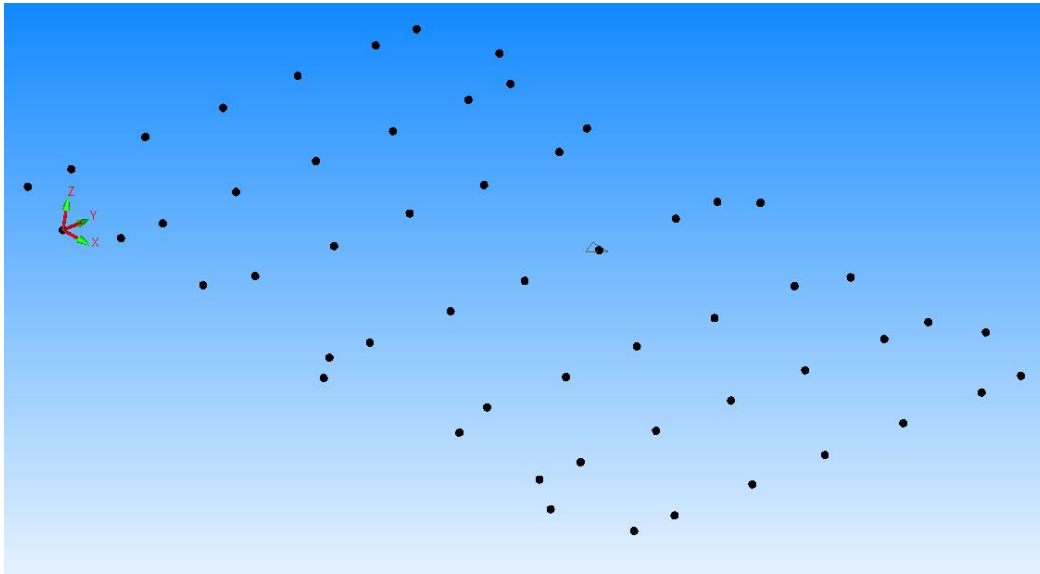
Figura C.3 – Realização das medidas de planicidade nas peças.



Para cada peça, foi gerado um conjunto de dados de planicidade conforme ilustrado na Figura C.4.



Figura C.4 – Ilustração dos pontos medidos



Os resultados das medições para os *dummies* estão apresentados na Tabela C.1. É possível notar que alguns valores são positivos e outros negativos, ou seja, a superfície apresenta relevos e depressões em relação ao plano de referência formado pelos pontos R1, R2 e R3.

Tabela C.1 – Medidas para os *dummies*

Ponto	X	Y	DUMMIES (mm)				
			ZD1	ZD2	ZD3	ZD4	ZD5
1	23.0	148.5	0.000	-0.011	0.019	0.018	0.003
2	107.0	148.5	0.001	-0.004	-0.010	-0.005	0.005
3	181.0	148.5	-0.012	-0.007	-0.031	-0.033	-0.013
4	4.5	140.0	0.004	-0.023	0.013	0.009	-0.005
5	34.6	140.0	0.003	-0.013	0.017	0.014	0.007
6	60.0	140.0	0.009	-0.022	0.014	0.016	-0.001
7	101.9	140.0	0.005	0.018	0.019	0.022	0.011
8	144.0	140.0	0.009	0.019	-0.002	-0.014	0.006
9	169.4	140.0	0.005	0.021	-0.011	-0.008	0.006
10	199.5	140.0	0.000	0.014	-0.027	-0.024	-0.004
11	4.5	126.0	-0.010	-0.034	0.012	0.004	-0.004
12	34.6	126.0	-0.008	-0.021	0.018	0.028	-0.001

continua

Tabela C.1 - Continuação

13	60.0	126.0	-0.016	-0.009	0.011	0.029	-0.028
14	101.9	126.0	0.020	0.035	0.010	0.046	-0.016
15	144.0	126.0	-0.015	0.021	-0.003	0.018	-0.025
16	169.4	126.0	-0.008	0.028	-0.004	0.003	0.001
17	199.5	126.0	-0.002	0.011	-0.023	-0.017	0.003
18	4.5	99.5	-0.026	-0.034	-0.006	-0.002	-0.017
19	34.6	99.5	-0.038	-0.034	0.011	0.008	-0.063
20	60.0	99.5	-0.046	-0.028	-0.001	0.023	-0.112
21	101.9	99.5	-0.031	0.005	0.019	0.041	-0.085
22	144.0	99.5	-0.041	0.012	-0.011	0.018	-0.106
23	169.4	99.5	-0.024	0.016	-0.017	-0.001	-0.053
24	199.5	99.5	0.001	0.018	-0.032	-0.016	-0.001
25	4.5	73.0	-0.018	-0.039	-0.010	-0.017	-0.024
26	34.6	73.0	-0.035	-0.031	0.004	0.009	-0.066
27	60.0	73.0	-0.060	-0.039	0.004	0.030	-0.151
28	101.9	73.0	-0.031	-0.006	0.018	0.039	-0.087
29	144.0	73.0	-0.074	0.001	-0.021	0.023	-0.127
30	169.4	73.0	-0.040	0.033	-0.015	0.014	-0.054
31	199.5	73.0	-0.009	0.034	-0.027	-0.014	-0.004
32	4.5	46.5	-0.027	-0.033	-0.008	-0.010	-0.027
33	34.6	46.5	-0.051	-0.037	0.006	0.000	-0.064
34	60.0	46.5	-0.052	-0.023	0.015	0.023	-0.096
35	101.9	46.5	-0.032	-0.005	0.029	0.031	-0.061
36	144.0	46.5	-0.049	-0.019	0.001	0.004	-0.086
37	169.4	46.5	-0.023	0.010	-0.003	-0.001	-0.041
38	199.5	46.5	0.002	0.017	-0.010	-0.011	0.004
39	4.5	20.0	-0.023	-0.018	-0.001	-0.012	-0.023
40	34.6	20.0	-0.026	-0.013	0.022	0.003	-0.029
41	60.0	20.0	-0.019	0.000	0.024	0.026	-0.032
42	101.9	20.0	0.029	0.041	0.050	0.039	-0.006
43	144.0	20.0	0.003	0.024	0.019	0.015	-0.019
44	169.4	20.0	0.014	0.019	0.005	0.003	0.009
45	199.5	20.0	0.016	0.019	-0.010	-0.008	0.017
46	4.5	6.0	-0.012	-0.016	-0.006	-0.005	-0.011
47	34.6	6.0	-0.004	0.004	0.022	0.017	-0.006
48	60.0	6.0	0.018	0.008	0.034	0.029	-0.005
49	101.9	6.0	0.016	0.016	0.046	0.034	0.016
50	144.0	6.0	0.025	0.024	0.034	0.016	0.015

continua

Tabela C.1 – Conclusão

51	169.4	6.0	0.020	0.014	0.021	0.011	0.026
52	199.5	6.0	0.013	0.009	0.000	0.003	0.015
53	23.0	-2.5	-0.006	0.002	0.001	0.015	-0.004
54	107.0	-2.5	0.020	0.015	0.024	0.025	0.015
55	181.0	-2.5	0.021	0.001	-0.001	0.006	0.012

Para uma visualização qualitativa, utilizou-se o programa *Surfer® 10* do fabricante *Golden Software*. Foram geradas imagens em 3 dimensões e curvas de nível usando os valores de planicidade de todos os *dummies*, Figura C.5 a Figura C.14.

Figura C.5 – Visualização 3D das imperfeições do *dummy* D1

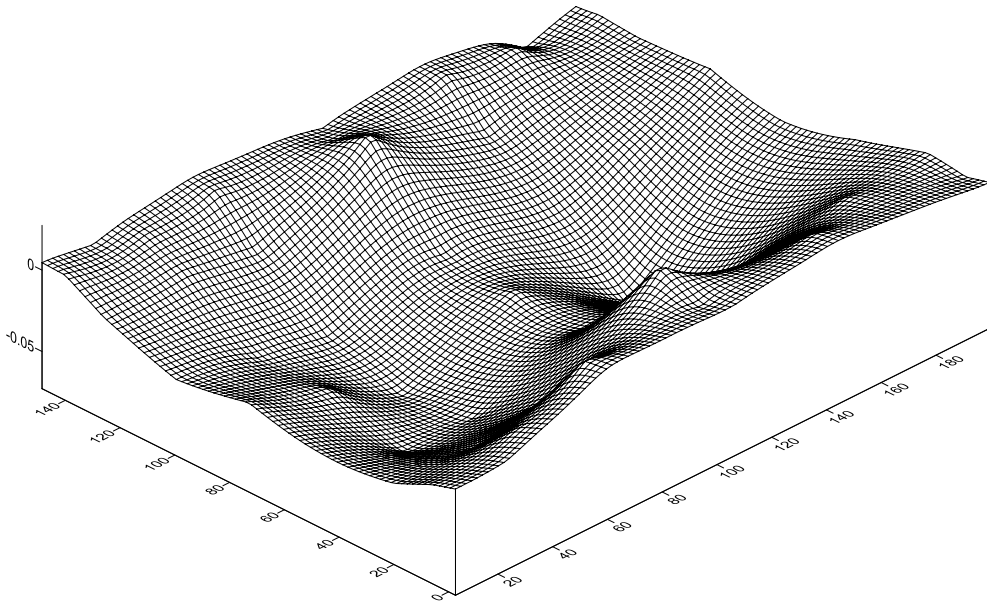


Figura C.6 – Mapa com curvas de nível da planicidade do *dummy* D1

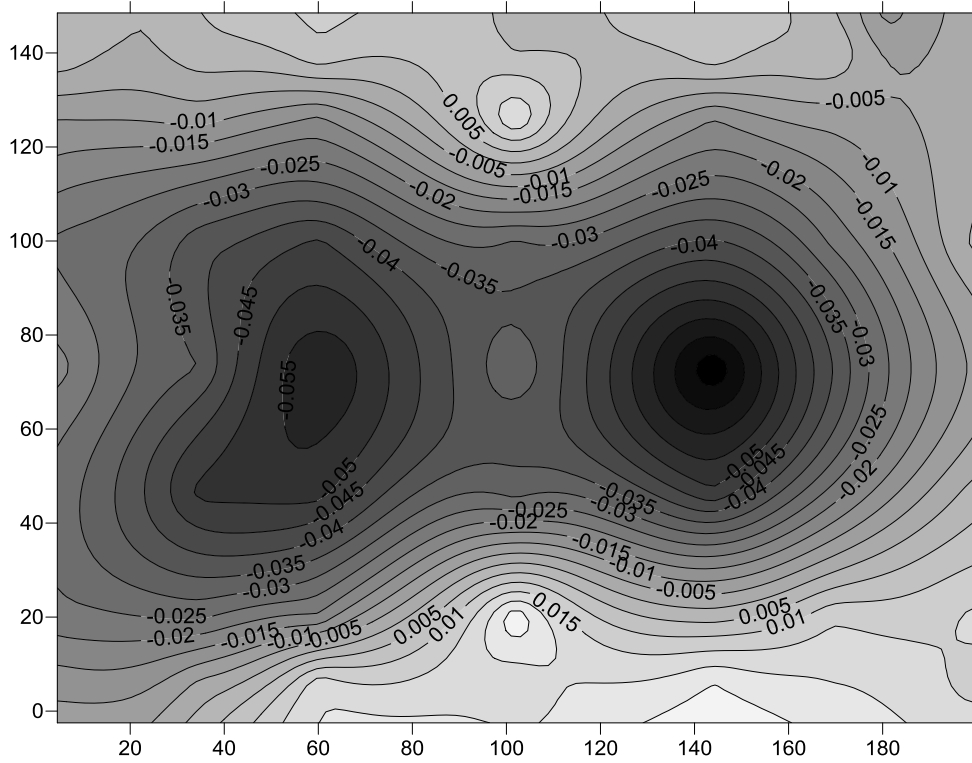


Figura C.7 - Visualização 3D das imperfeições do *dummy* D2

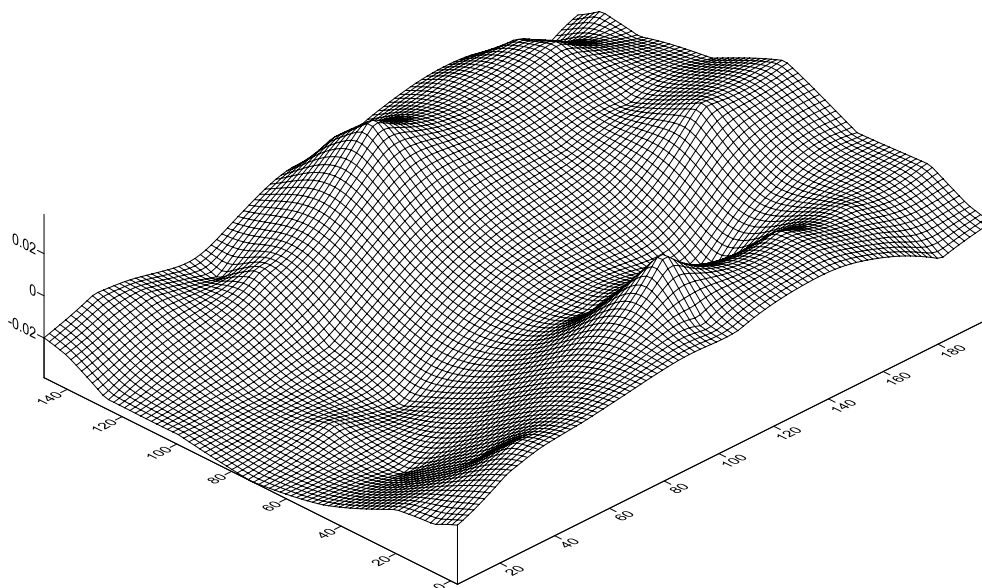


Figura C.8 - Mapa com curvas de nível da planicidade do *dummy* D2

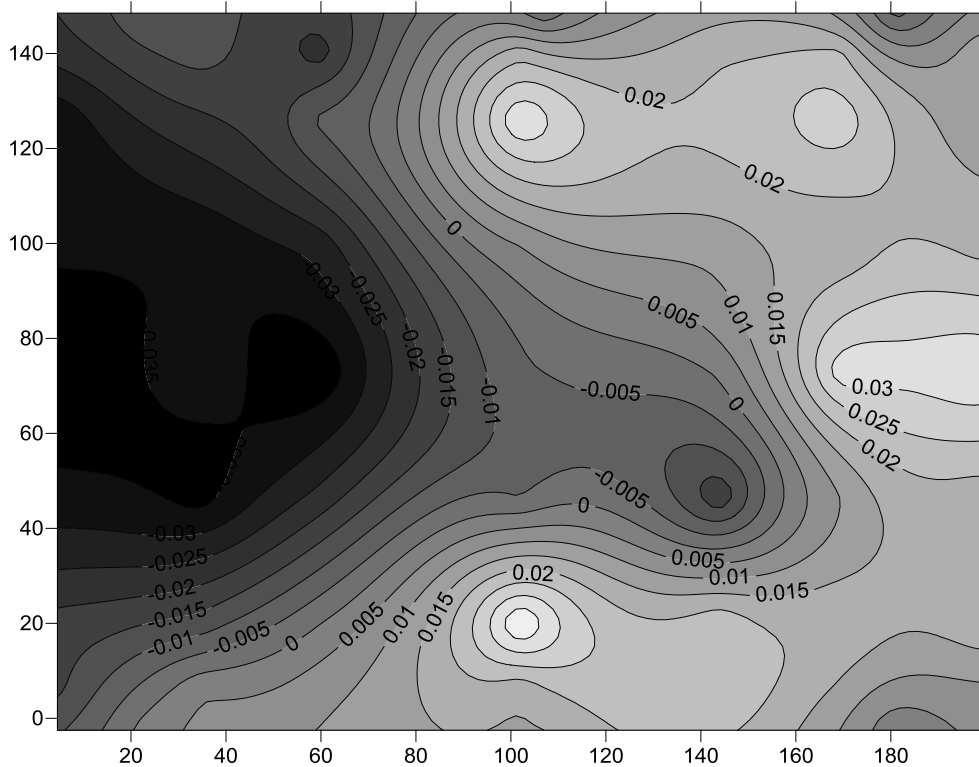


Figura C.9 - Visualização 3D das imperfeições do *dummy* D3

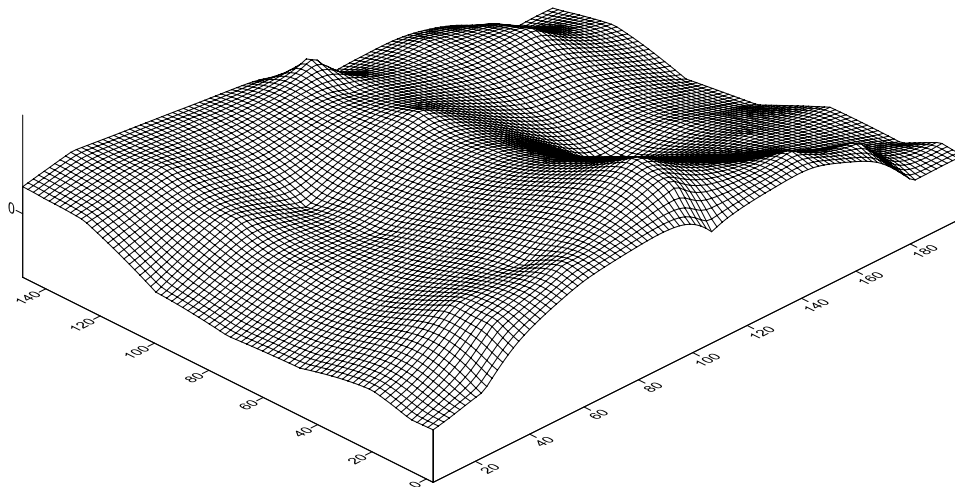


Figura C.10 - Mapa com curvas de nível da planicidade do *dummy* D3

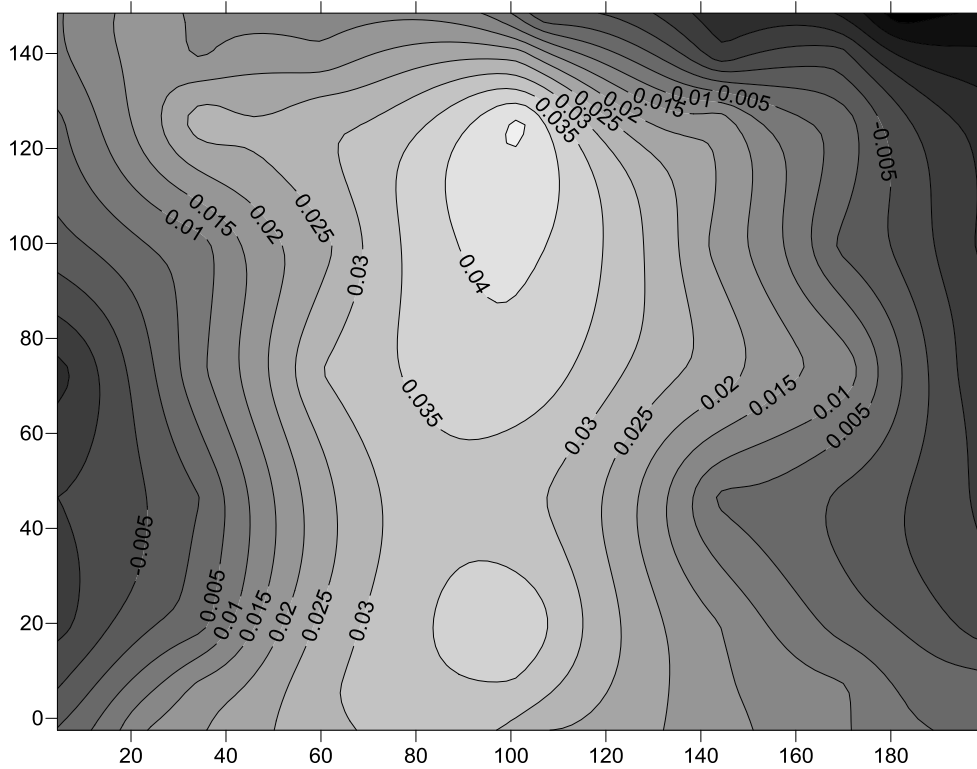


Figura C.11 - Visualização 3D das imperfeições do *dummy* D4

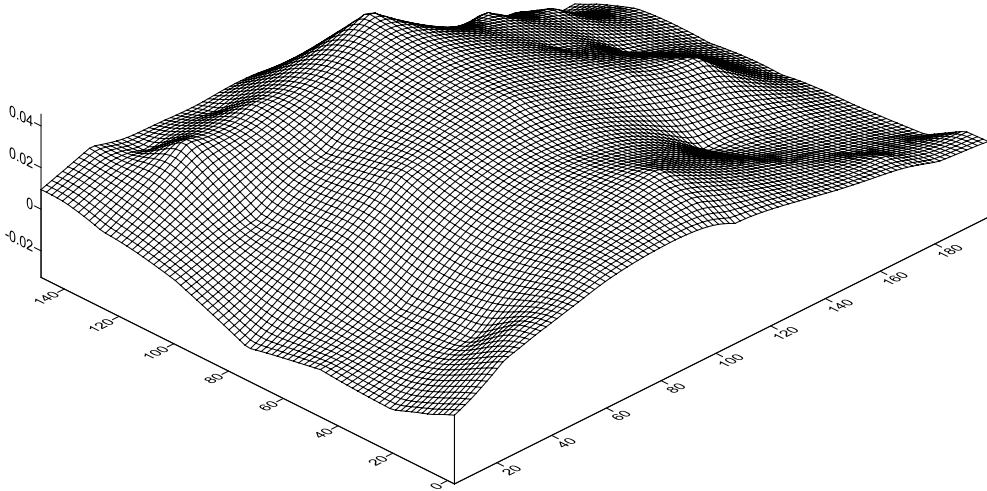


Figura C.12 - Mapa com curvas de nível da planicidade do *dummy* D4

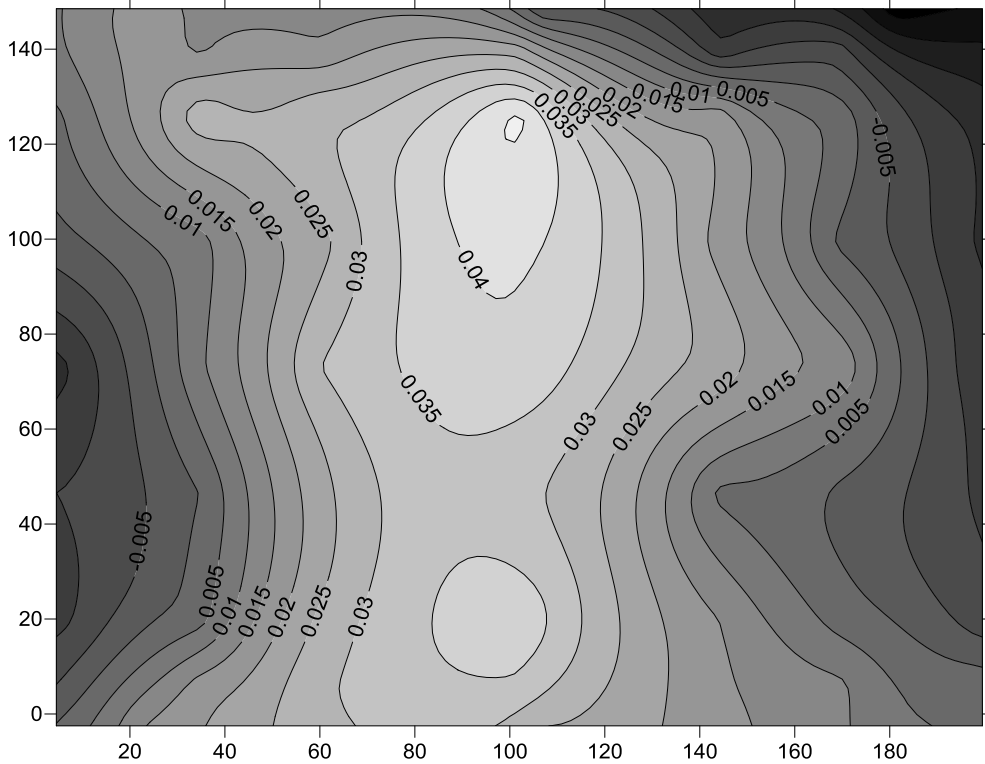


Figura C.13 - Visualização 3D das imperfeições do *dummy* D5

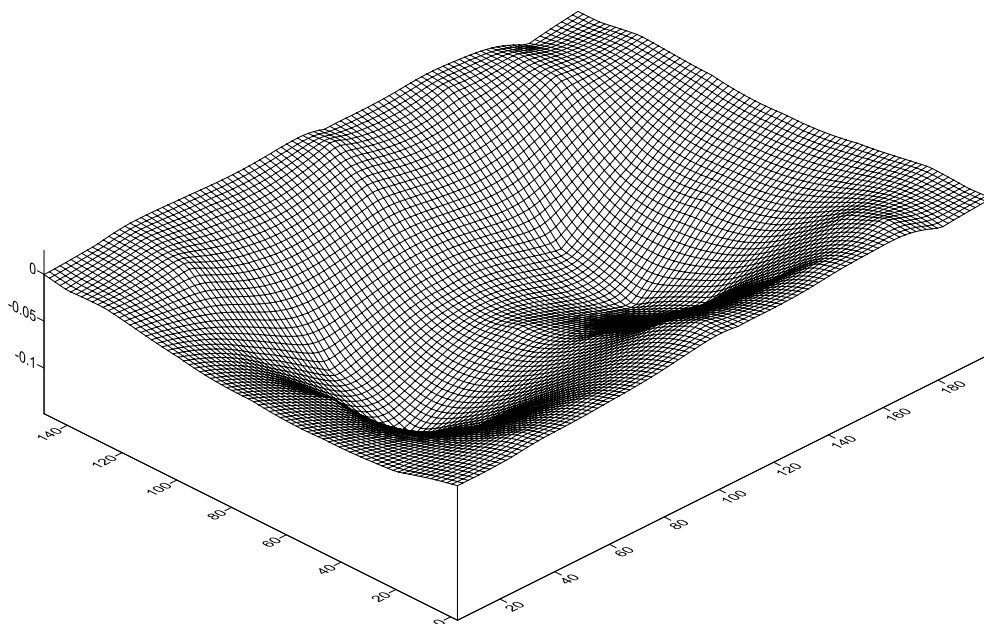
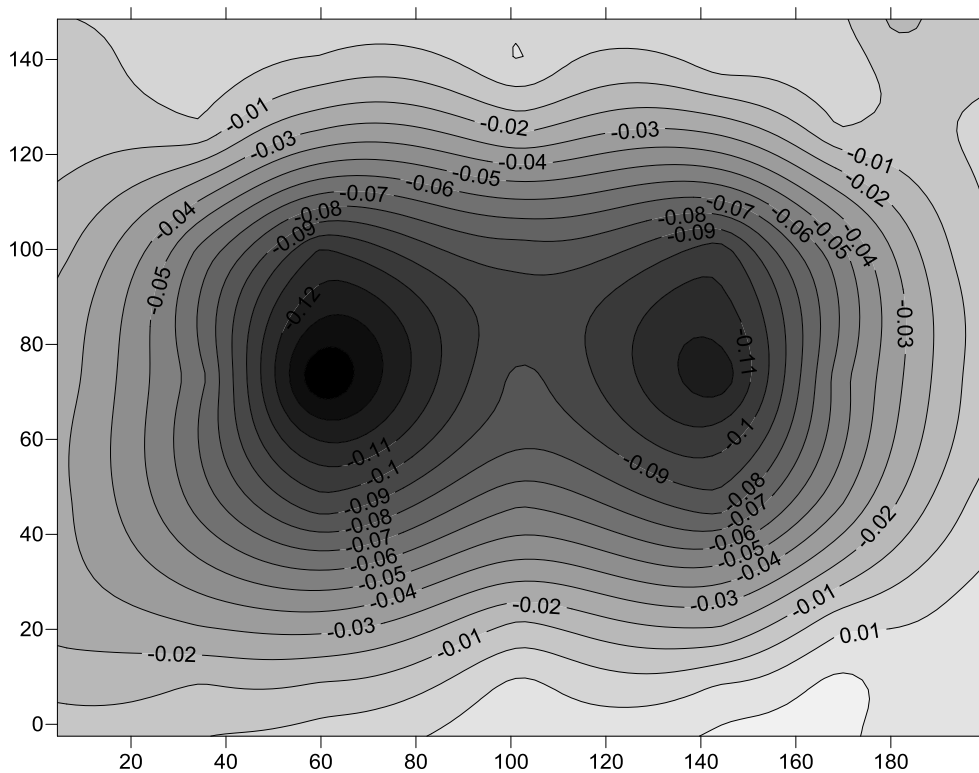


Figura C.14 - Mapa com curvas de nível da planicidade do *dummy* D5





Os resultados das medições para os painéis estão apresentados na Tabela C.2. Assim como para os *dummies*, é possível notar que alguns valores são positivos e outros negativos, ou seja, a superfície apresenta relevos e depressões em relação ao plano de referência formado pelos pontos R1, R2 e R3.

Tabela C.2 – Medidas para os painéis

Ponto	X	Y	PAINÉIS (mm)				
			ZP1	ZP2	ZP3	ZP4	ZP5
1	23.0	148.5	0.015	-0.126	-0.022	-0.002	0.007
2	107.0	148.5	-0.042	-0.014	-0.028	-0.018	0.024
3	181.0	148.5	-0.070	-0.009	-0.012	0.000	0.021
4	4.5	140.0	0.023	0.022	-0.001	0.010	0.013
5	34.6	140.0	0.027	0.020	-0.019	0.012	0.003
6	60.0	140.0	0.006	0.016	-0.014	0.029	0.010
7	101.9	140.0	-0.009	0.008	-0.016	0.011	0.012
8	144.0	140.0	-0.024	0.007	-0.008	0.031	0.014
9	169.4	140.0	-0.046	0.011	0.011	0.017	0.029
10	199.5	140.0	-0.057	-0.105	0.011	0.010	0.037
11	4.5	126.0	0.029	0.015	-0.001	0.011	0.032
12	34.6	126.0	0.036	0.011	-0.004	0.019	0.023
13	60.0	126.0	0.018	0.031	-0.001	0.020	0.022
14	101.9	126.0	0.006	0.014	-0.002	0.008	0.039
15	144.0	126.0	0.002	0.016	0.002	0.028	0.037
16	169.4	126.0	-0.023	0.023	0.020	0.013	0.042
17	199.5	126.0	-0.046	0.012	0.020	-0.011	0.039
18	4.5	99.5	0.027	0.022	-0.002	0.028	0.009
19	34.6	99.5	0.026	0.030	-0.002	0.034	-0.024
20	60.0	99.5	0.021	0.043	0.008	0.028	-0.010
21	101.9	99.5	0.011	0.046	0.019	0.012	0.021
22	144.0	99.5	0.006	0.040	0.012	0.022	0.011
23	169.4	99.5	-0.004	0.047	0.036	0.000	0.014
24	199.5	99.5	-0.017	0.042	0.044	-0.010	0.041
25	4.5	73.0	0.035	0.020	-0.002	0.031	-0.012
26	34.6	73.0	0.031	0.021	-0.006	0.035	0.005
27	60.0	73.0	0.025	0.047	0.006	0.021	-0.006

continua

Tabela C.2 - Conclusão

28	101.9	73.0	0.017	0.051	-0.002	0.006	0.011
29	144.0	73.0	0.007	0.048	-0.003	0.030	0.001
30	169.4	73.0	-0.024	0.041	0.009	0.017	0.011
31	199.5	73.0	-0.031	0.014	0.020	-0.007	0.027
32	4.5	46.5	0.025	0.031	-0.015	0.016	-0.044
33	34.6	46.5	0.032	0.022	-0.019	0.026	-0.051
34	60.0	46.5	0.018	0.051	-0.002	0.024	-0.046
35	101.9	46.5	0.015	0.045	0.000	0.014	-0.024
36	144.0	46.5	0.010	0.046	0.000	0.025	-0.026
37	169.4	46.5	-0.008	0.051	0.020	0.005	-0.019
38	199.5	46.5	-0.012	0.036	0.011	-0.003	-0.004
39	4.5	20.0	0.040	0.001	-0.042	0.010	-0.070
40	34.6	20.0	0.042	0.005	-0.036	0.015	-0.064
41	60.0	20.0	0.032	0.020	-0.031	0.023	-0.071
42	101.9	20.0	0.025	0.005	-0.019	0.003	-0.042
43	144.0	20.0	0.004	0.032	-0.010	0.011	-0.044
44	169.4	20.0	-0.008	0.017	-0.006	0.016	-0.037
45	199.5	20.0	-0.014	0.026	-0.006	-0.003	-0.020
46	4.5	6.0	0.039	-0.002	-0.042	-0.001	-0.047
47	34.6	6.0	0.030	-0.001	-0.041	0.008	-0.051
48	60.0	6.0	0.028	0.021	-0.033	0.018	-0.047
49	101.9	6.0	0.025	0.038	-0.027	-0.011	-0.027
50	144.0	6.0	0.001	0.031	-0.015	0.009	-0.020
51	169.4	6.0	-0.009	0.034	-0.016	-0.006	-0.007
52	199.5	6.0	-0.009	0.025	-0.019	-0.001	0.012
53	23.0	-2.5	0.022	0.015	-0.055	0.000	-0.047
54	107.0	-2.5	0.004	0.025	-0.042	-0.021	-0.013
55	181.0	-2.5	-0.021	0.021	-0.033	-0.016	0.002

De forma análoga, também utilizando o programa *Surfer® 10*, geradas imagens em 3D e curvas de nível usando os valores de planicidade de todos os painéis, Figura C.15 a Figura C.24.

Figura C.15 - Visualização 3D das imperfeições do painel P1

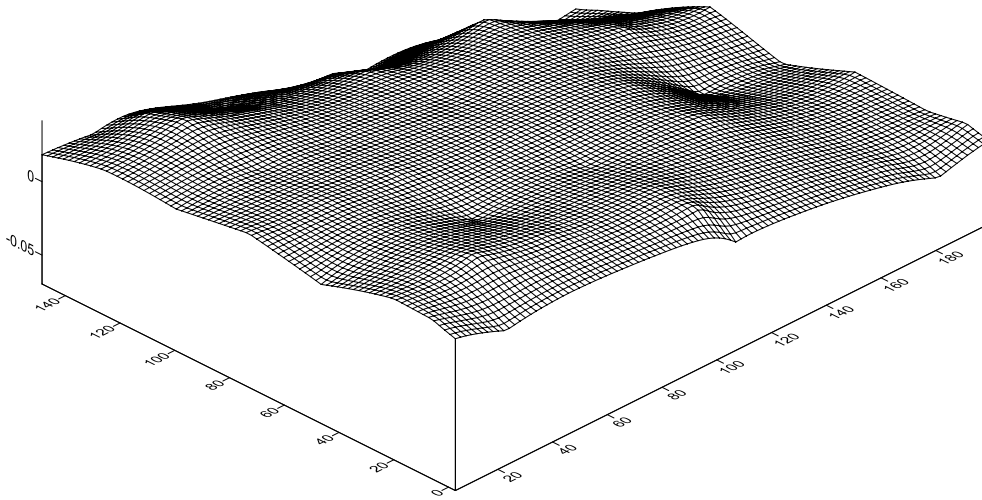


Figura C.16 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P1

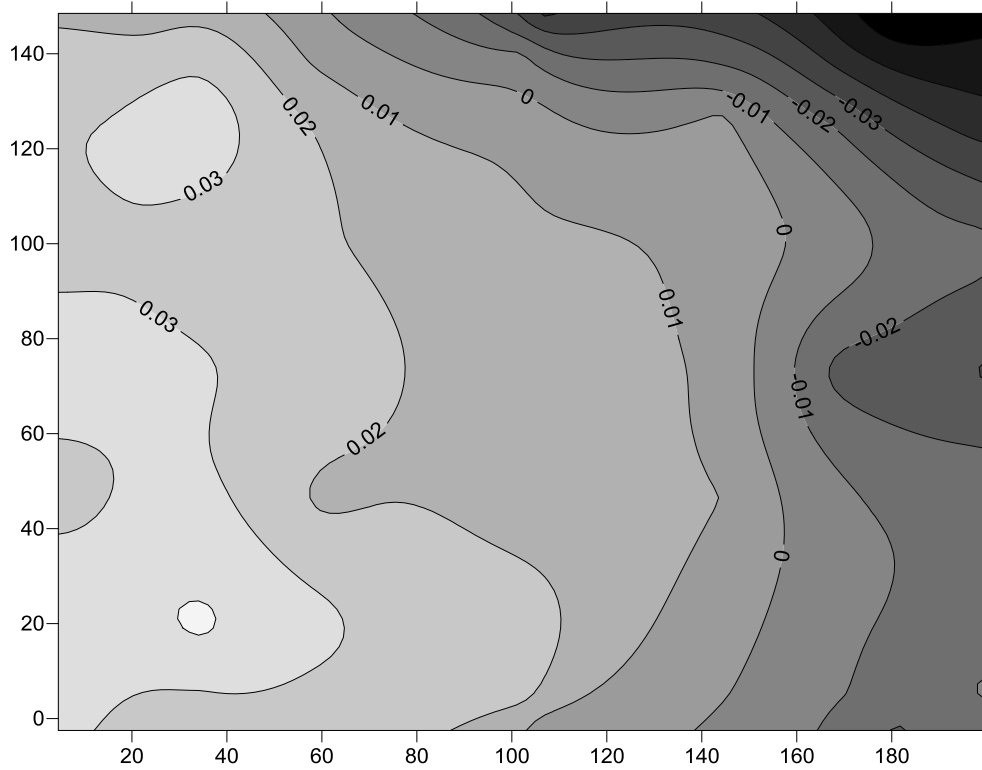


Figura C.17 - Visualização 3D das imperfeições do painel P2

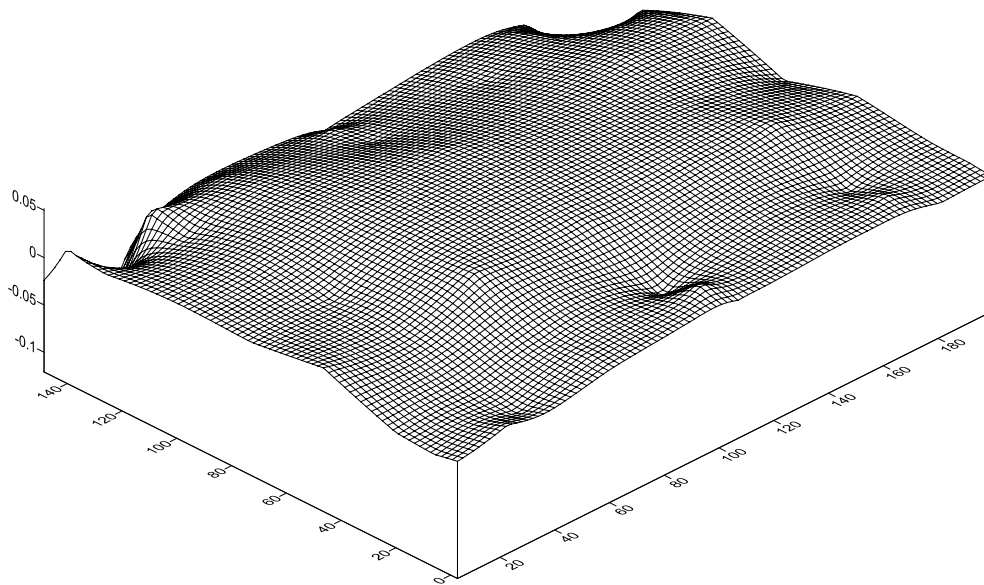


Figura C.18 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P2

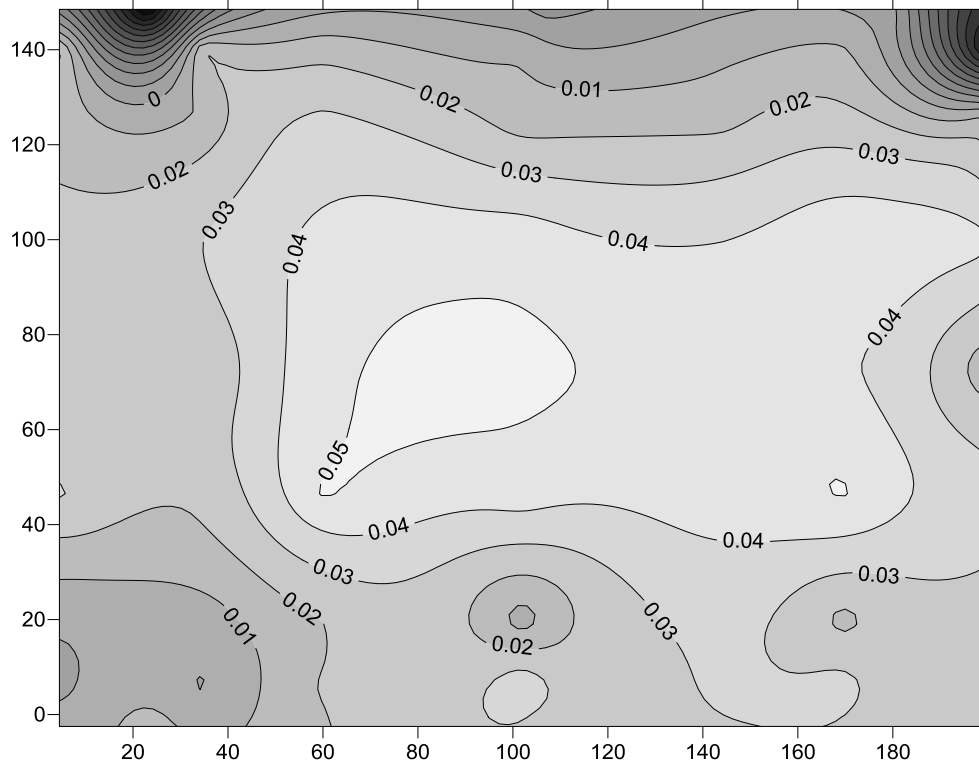


Figura C.19 - Visualização 3D das imperfeições do painel P3

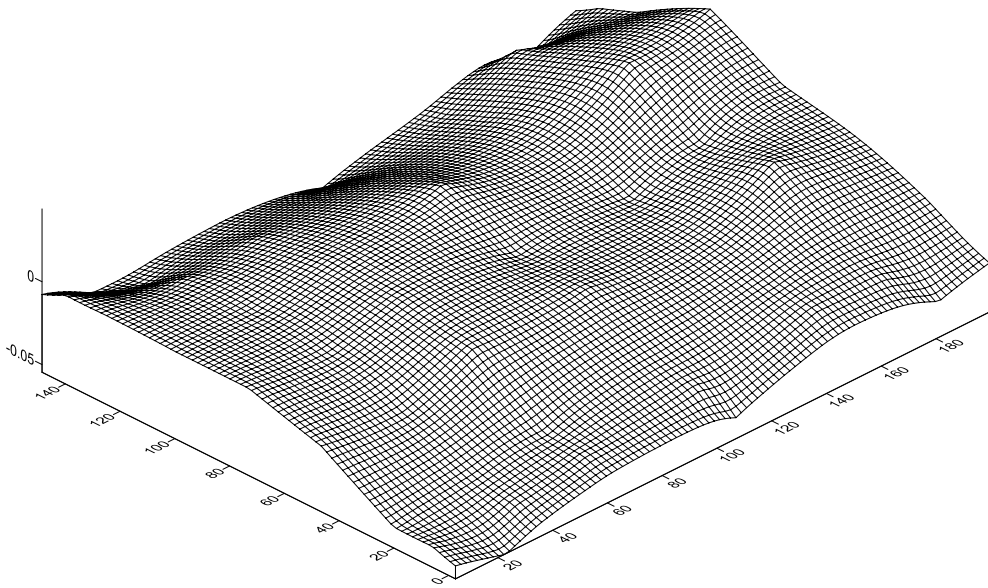


Figura C.20 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P3

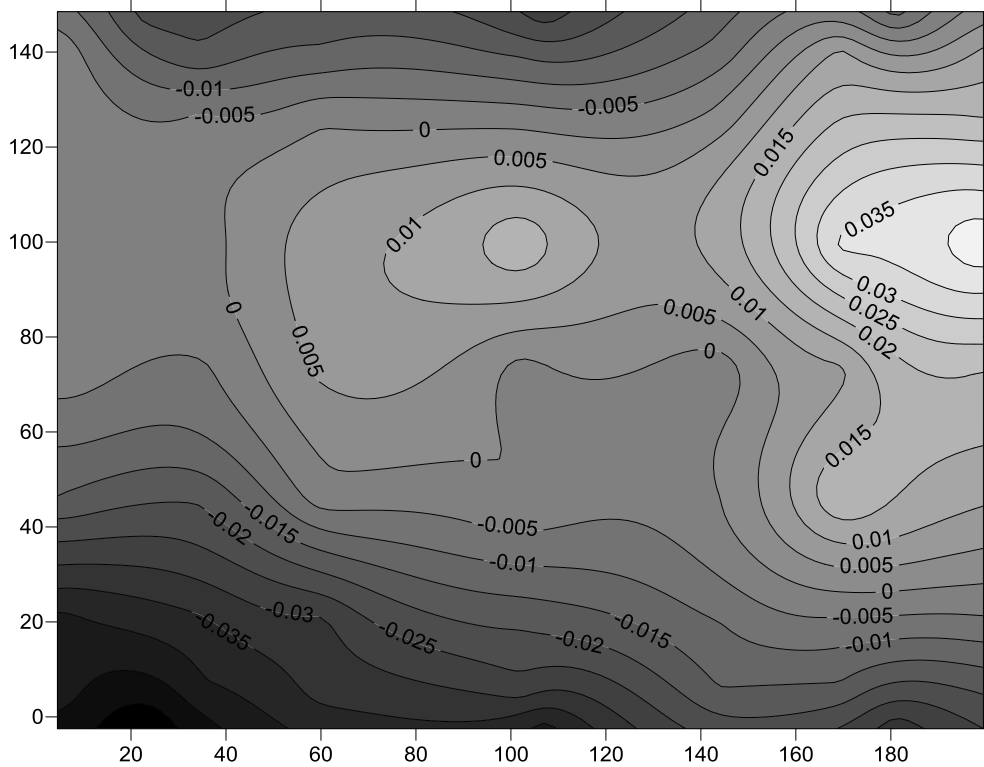


Figura C.21 - Visualização 3D das imperfeições do painel P4

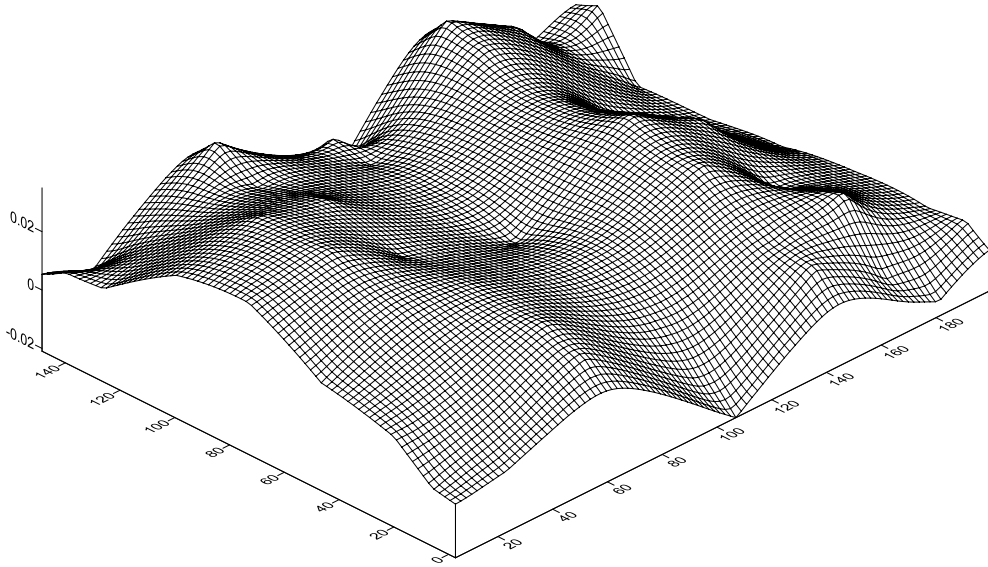


Figura C.22 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P4

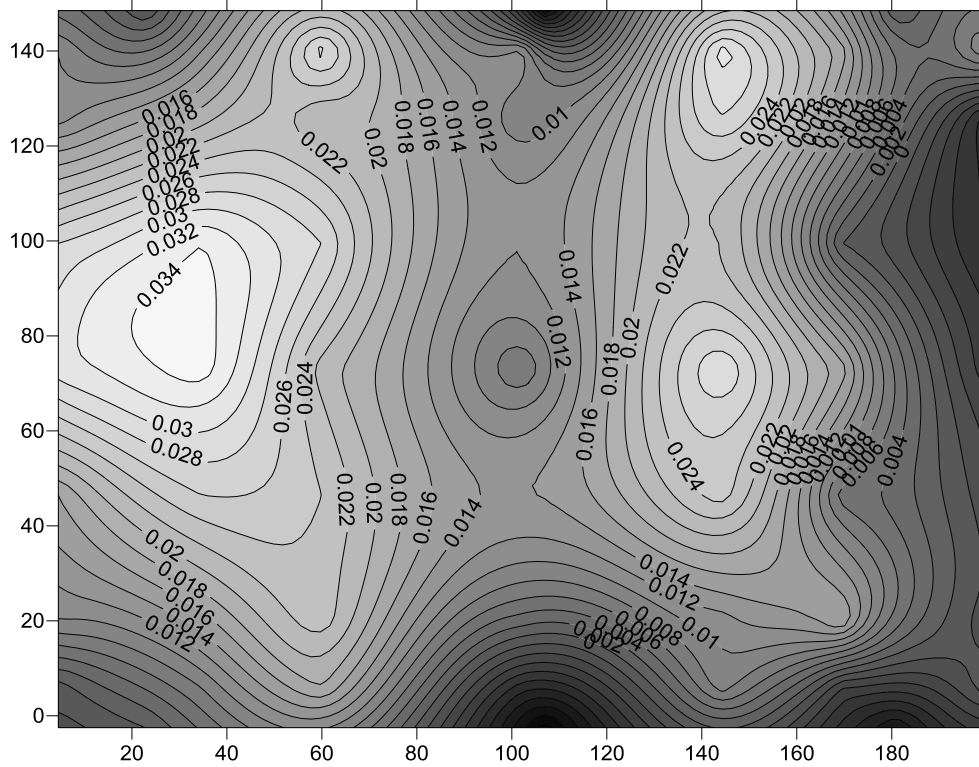


Figura C.23 - Visualização 3D das imperfeições do painel P5

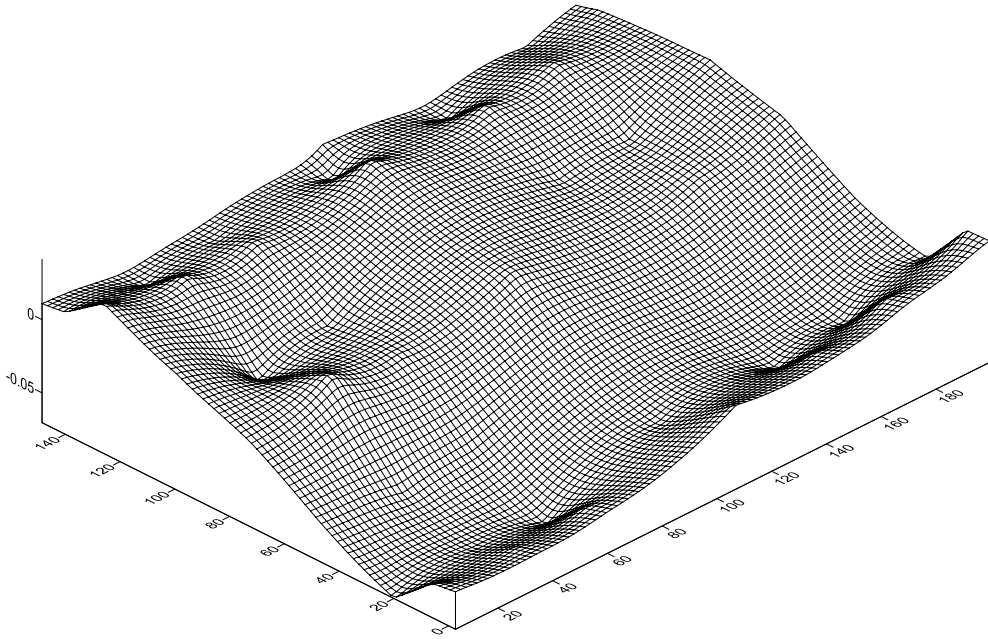
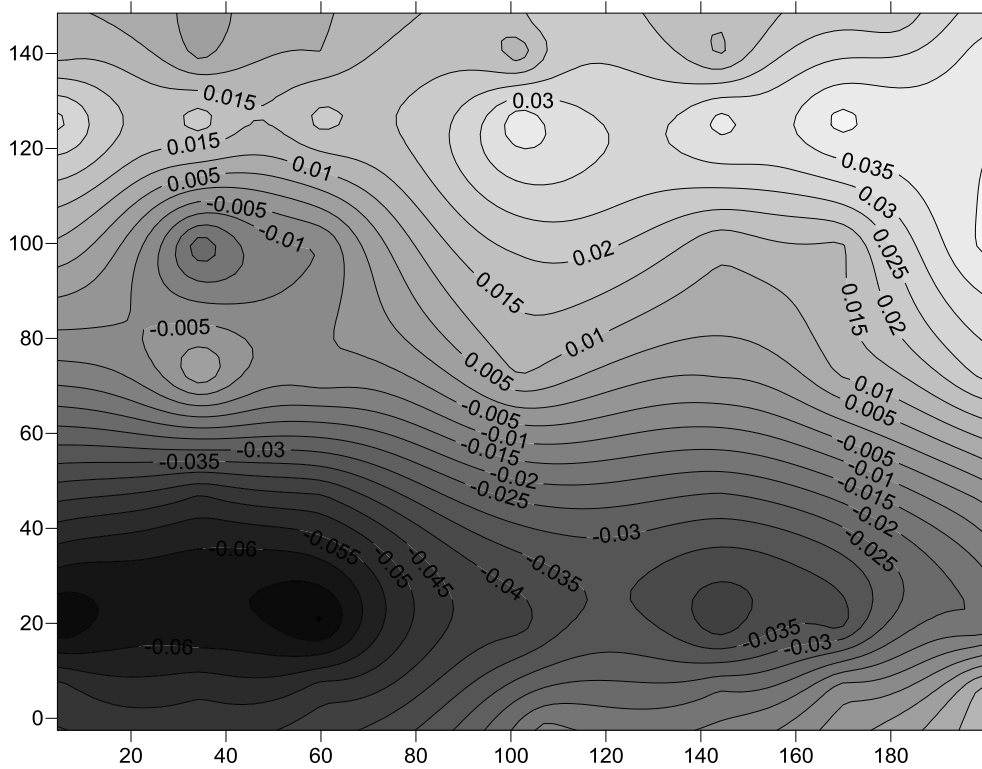


Figura C.24 - Mapa com curvas de nível da planicidade do painel P5



## C.2 Escolha dos Pares

Com as medidas realizadas, foi realizado um tratamento estatístico dos dados para escolher os pares que apresentam menor diferença na distância média dos pontos coincidentes.

A Tabela C.3 mostra a distância média em Z entre os pontos no *dummy* e no painel, correspondentes na mesma coordenada.

Tabela C.3 – Distância média entre os pontos correspondentes, em mm

	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>
<b>P1</b>	<b>0.060</b>	0.061	0.065	0.049	0.061
<b>P2</b>	0.048	<b>0.055</b>	0.060	0.061	0.066
<b>P3</b>	0.064	0.070	0.041	<b>0.058</b>	0.076
<b>P4</b>	0.040	0.039	0.038	0.034	<b>0.051</b>
<b>P5</b>	0.076	0.080	<b>0.050</b>	0.081	0.074

Os pares escolhidos foram os que apresentaram médias de distância semelhantes, para que nenhum conjunto ficasse com imperfeições muito maiores que os outros. Assim, os pares escolhidos foram: D1P1, D2P2, D3P5, D4P3, D5P4.

## C.3 Rugosidade

Foram realizadas medidas de rugosidade das superfícies dos *dummies* e dos painéis utilizando o medidor de rugosidade *Mitutoyo SJ-201*, Figura C.25.

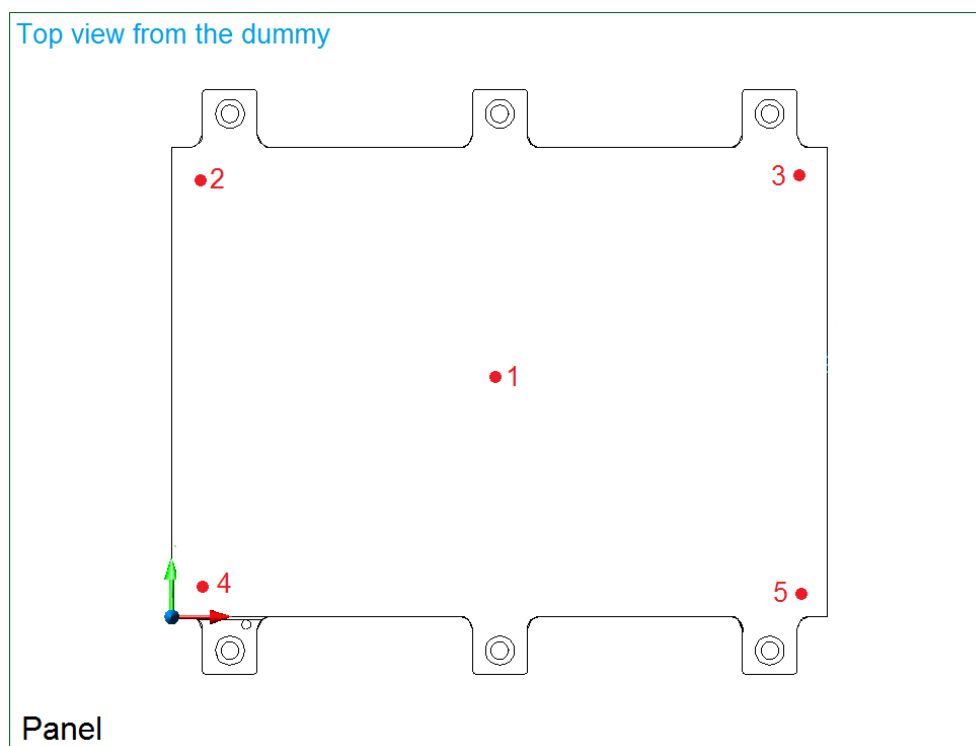


Figura C.25 – Medidas de rugosidade nas peças



A rugosidade foi medida em 5 pontos de cada peça, um no centro da interface e outros quatro próximos aos vértices do *dummy*, Figura C.26.

Figura C.26 – Pontos de medição da rugosidade superficial



Os resultados de medida da rugosidade dos *dummies* e painéis são apresentados na Tabela C.4.

Tabela C.4 – Valores de rugosidade medidos nos *dummies* e painéis

Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ )						
	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	MÉDIA
<b>D1</b>	0.57	0.65	0.76	0.59	0.62	<b>0.64</b>
<b>D2</b>	0.40	0.49	0.68	0.50	0.59	<b>0.53</b>
<b>D3</b>	0.57	0.72	0.69	0.42	0.60	<b>0.60</b>
<b>D4</b>	0.54	0.64	0.61	0.58	0.62	<b>0.60</b>
<b>D5</b>	0.63	0.58	0.59	0.71	0.63	<b>0.63</b>
<b>P1</b>	0.27	0.26	0.25	0.28	0.25	<b>0.26</b>
<b>P2</b>	0.27	0.28	0.28	0.28	0.27	<b>0.28</b>
<b>P3</b>	0.29	0.26	0.28	0.28	0.27	<b>0.28</b>
<b>P4</b>	0.26	0.24	0.25	0.27	0.26	<b>0.26</b>
<b>P5</b>	0.29	0.28	0.29	0.24	0.29	<b>0.28</b>

Nota-se que a rugosidade nos *dummies* é maior do que nos painéis, isso indica um melhor acabamento superficial dos painéis.

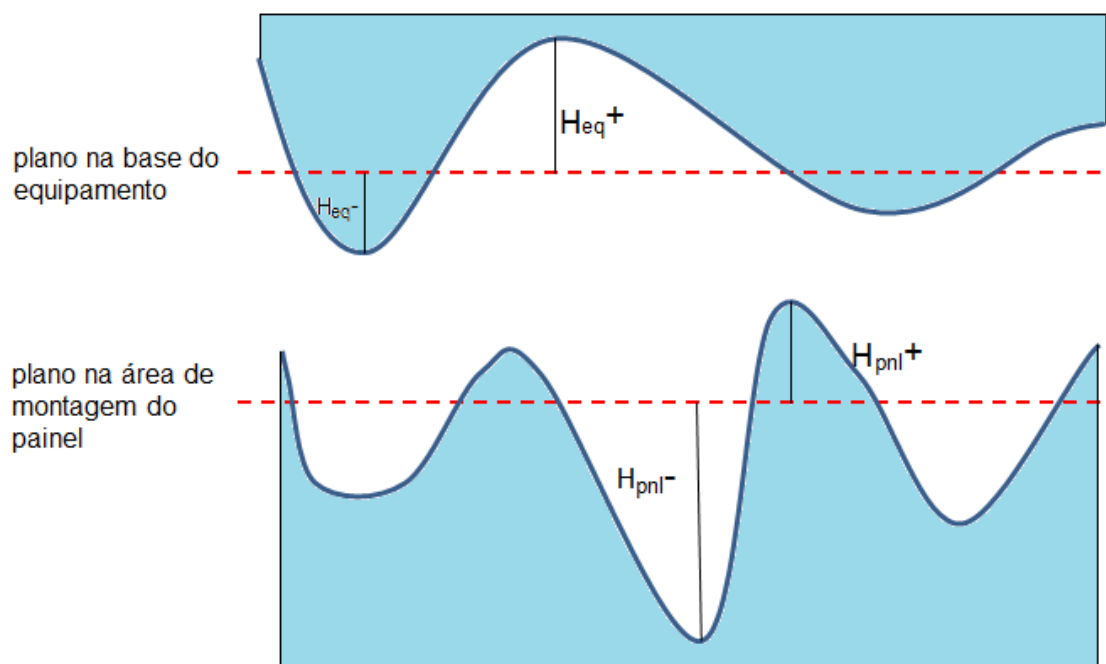
#### **C.4 Metodologia de Cálculo de Espessura Mínima de Aplicação de Graxa Térmica e RTV566**

A fim de identificar a espessura mínima de aplicação de graxa térmica ou RTV566 em uma determinada interface de montagem de equipamento em painel estrutural, foi desenvolvida uma metodologia para garantir minimamente que o vão na interface criado pela variação de planicidade e rugosidade das partes seja preenchido com algum destes materiais, os quais são fluidos no momento da aplicação.

Inicialmente, deve-se definir um plano formado por três pontos na base do equipamento, preferencialmente localizados na região dos parafusos, assim como foi feito para mapear a planicidade dos *dummies* do experimento deste trabalho.

Deve-se escolher pelo menos cinco pontos ao longo da base do equipamento (sempre incluído o centro) para realizar a medida da altura em relação ao plano, anotando os desvios máximos, Figura C.27.

Figura C.27 – Ilustração dos desvios máximos dos planos traçados



Anotar o máximo desvio ( $H_{eq}$ ) em relação ao plano, ou seja, o máximo pico ou vale que pode causar um vão na interface de montagem, Equação C.1.

$$H_{eq} = \max(|H_{eq+}|, |H_{eq-}|) \quad (C.1)$$

Assim, pode-se calcular a planicidade a partir de  $H_{eq}$  e da maior dimensão ( $L_{max}$ ) da base do equipamento usando a Equação C.2 na base do equipamento e conferir se atende o requisito, usualmente de 0,1 mm/100 mm para os satélites do INPE.

$$\bar{p}_{eq} = \frac{H_{eq}}{L_{max}} \quad (C.2)$$

No painel, deve-se proceder da mesma forma. Traçar um plano utilizando três pontos. É recomendado que se usem pontos equivalentes aos usados no equipamento. Assim como no equipamento, escolher pelo menos cinco pontos ao longo da área de montagem do equipamento (sempre incluído o centro) para realizar a medida da altura em relação ao plano.

Anotar o máximo desvio ( $H_{pnl}$ ) em relação ao plano, ou seja, o máximo pico ou vale que pode causar um vão na interface de montagem, Eq C.3.

$$H_{pnl} = \max(|H_{pnl} +|, |H_{pnl} -|) \quad (C.3)$$

Assim, pode-se calcular a planicidade no painel de montagem a partir de  $H_{pnl}$  e da maior dimensão ( $L_{max}$ ) da base do equipamento usando a Equação C.4 e conferir se atende o requisito, o qual normalmente é o mesmo do painel.

$$\bar{p}_{pnl} = \frac{H_{pnl}}{L_{max}} \quad (C.4)$$

Ainda, a rugosidade das duas superfícies pode contribuir para o aumento do vão formado na interface. Mesmo que a contribuição esperada seja pequena, é necessário considerá-la.

Deve-se medir a rugosidade  $R_a$  tanto na base do equipamento como na região da montagem no painel em pelo menos cinco pontos e considerar a média.

Assim, com os valores de planicidade na base do equipamento e na área de montagem do painel e valores de rugosidade média, é possível calcular a

espessura mínima na qual o material (graxa térmica ou RTV 566) deve ser aplicado usando-se usar a Equação C.5.

$$\delta_{IF,min} = R_{a,eq+} + R_{a,pnl} + (\bar{p}_{eq} + \bar{p}_{pnl})L_{max} \quad (C.5)$$

Para exemplificar, o cálculo da espessura mínima que deveria ser aplicada a cada um dos conjuntos utilizados neste trabalho é apresentado. Inicialmente, são levantados os dados de  $H_{eq}$  e  $H_{pnl}$ , seguidos do cálculo de  $\bar{p}_{eq}$  e  $\bar{p}_{pnl}$ , todos com  $L_{max}= 204$  mm, assim como os dados de rugosidade. Os valores estão resumidos na Tabela C.5.

Tabela C.5 – Valores utilizados para cálculo de espessura mínima no exemplo da interface D1P1.

<b>Superfície</b>	<b><math>H_{eq}</math> (mm)</b>	<b><math>\bar{p}_{eq}</math> (mm/m)</b>	<b><math>R_{a,eq}</math> (mm)</b>
Dummy D1	0,074	$3,6 \times 10^{-4}$	$5,4 \times 10^{-5}$
Dummy D2	0,041	$2,0 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-5}$
Dummy D3	0,050	$2,5 \times 10^{-4}$	$6,7 \times 10^{-5}$
Dummy D4	0,046	$2,3 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-5}$
Dummy D5	0,151	$7,4 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-5}$
<b>Superfície</b>	<b><math>H_{pnl}</math> (mm)</b>	<b><math>\bar{p}_{pnl}</math> (mm/m)</b>	<b><math>R_{a,pnl}</math> (mm)</b>
Painel P1	0,070	$3,4 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-5}$
Painel P2	0,126	$6,2 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-5}$
Painel P3	0,055	$2,7 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-5}$
Painel P4	0,035	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-5}$
Painel P5	0,071	$3,5 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-5}$

Assim, substituindo os valores da Tabela C.5 da Equação C.5 chegamos aos valores apresentados na Tabela C.6.

Tabela C.6 – Valores de espessura mínima de material a ser aplicada em cada conjunto.

<b>Conjunto</b>	<b>Espessura mínima <math>\delta_{IF,min}</math> (mm)</b>
D1P1	0,14
D2P2	0,17
D3P5	0,12
D4P3	0,10
D5P4	0,17

Assim, é possível observar que a maior espessura mínima de aplicação calculada foi de 0,17 mm, o que está dentro, pois ambos os conjuntos D4P3 e D4P4 tiveram aplicação de graxa térmica e RTV566 com 0,20 mm, respectivamente. Considerando um possível erro na aplicação, a espessura deve ser aproximadamente 20% maior.