



Estudo experimental e teórico sobre o efeito da inclinação no desempenho de tubos de calor com ranhuras axiais

Renan Gomes Rosa¹, Valeri Vlassov²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

¹Iniciação Científica na Divisão de Mecânica Espacial e Controle

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

renan.rosa@inpe.br

Resumo. *Tubos de calor são usados amplamente em satélites para fins de controle térmico. Os satélites, antes de serem lançados, passam por uma cadeia de testes, tanto ambientais como elétricos, e espera-se que esses tubos funcionem perfeitamente. Entretanto, o desempenho de tubos de calor com ranhuras axiais pode ser afetado por efeitos de gravidade. Este estudo se concentra na análise sobre como diferentes inclinações afetam o desempenho de um tubo de calor. Foram conduzidos testes com várias inclinações neutras e desfavoráveis, utilizando diferentes sistemas de refrigeração. Foi-se utilizado um tubo de calor ranhurado de alumínio, carregado com amônia. Nos tratamentos dos resultados experimentais, foi adotado um novo método de análise para diminuir as incertezas da variação da temperatura ambiental. As inclinações máximas em que o tubo de calor atinge seu limite capilar foram identificados. Resultados experimentais foram comparados com resultados teóricos obtidos para mesmas condições de testes.*

Palavras-chave: Tubo de calor; Método de análise; Estudo experimental; Análise de inclinação.

1. Introdução

Os tubos de calor são dispositivos de transferência de calor passivos que têm sido amplamente utilizados em diversas aplicações industriais e espaciais. Eles são extremamente eficientes em situações em que é necessário transferir e dissipar grandes quantidades de calor de maneira eficaz, além de funcionar em modo passivo, sem consumo de energia elétrica (JUNIOR, 2015).

A transferência de calor em um tubo de calor ocorre através de três mecanismos principais: condução, convecção e evaporação/condensação. O tubo de calor é composto por uma estrutura selada, geralmente soldada, que contém uma estrutura capilar. O tubo é carregado com um fluido de trabalho em estado de saturação, contendo interface líquido-vapor. O comprimento do tubo, em geral, é composto por três zonas principais: evaporador, condensador e adiabático. Inclusive, a zona adiabática pode não existir. O evaporador é a seção onde ocorre a evaporação do fluido de trabalho, absorvendo o calor da fonte quente. O vapor gerado se desloca para a seção do condensador, onde ocorre a condensação desse vapor, liberando o calor latente absorvido para o ambiente. O líquido condensado retorna ao evaporador por capilaridade ou ação gravitacional, completando o ciclo de transferência de calor (FAGHRI, 1994).



14° WETE

Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

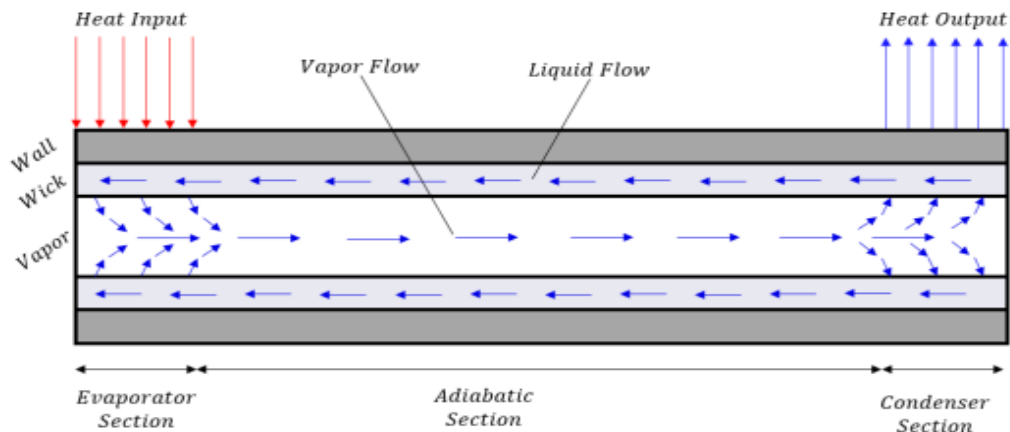


Figura 1 - Funcionamento do tubo de calor.

[Fonte: (ENKE, 2020)].

O "dry out" em um tubo de calor é um fenômeno crítico, que ocorre quando o fluido de trabalho dentro do tubo de calor evapora completamente, levando a uma interrupção no processo de transferência de calor. Essa situação acontece quando a demanda de calor excede a capacidade de fornecimento de líquido do tubo de calor. Quando o "dry out" ocorre, o tubo de calor deixa de cumprir sua função de forma eficaz, resultando em um aumento significativo na temperatura. Essa situação ocorre normalmente quando o tubo de calor atinge seu limite capilar. O "dry out" pode ocorrer com mais facilidade quando o tubo de calor é submetido em inclinações desfavoráveis, devido à gravidade, quando o tubo é posicionado com o evaporador para cima. A gravidade afeta a força capilar, apresentando o fluido do trabalho uma tendência de se deslocar para a extremidade oposta, para o condensador, interrompendo o processo de transferência de calor. A Figura 2 representa o fenômeno conhecido como "dry out".

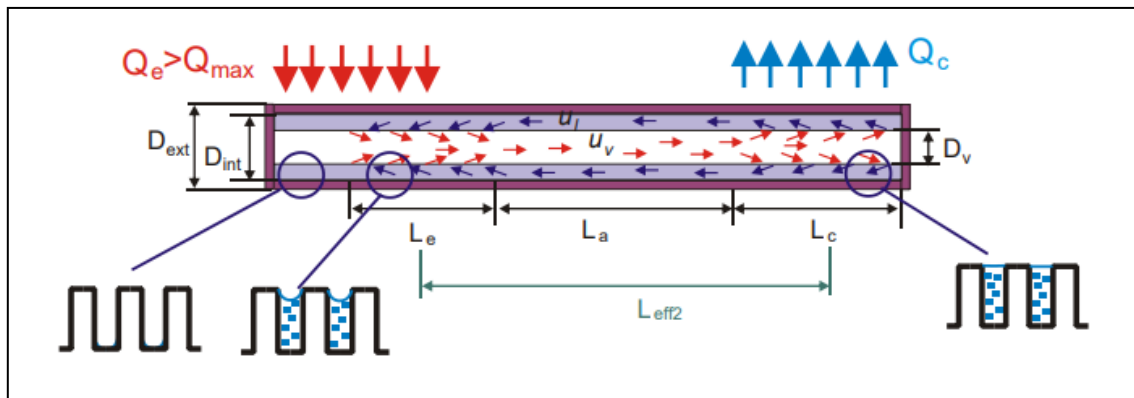


Figura 2 - Representa o fenômeno o "dry out" de modo parcial.

[Fonte: (VLASSOV, 2021)].

Os testes de tubos de calor em inclinações foram objetos de alguns estudos.

Loh C. et al., em 2005, apresentaram resultados de testes de inclinação de pequenos tubos com estruturas capilares diferentes. Tubos de calor possuíam diâmetros de 4, 5 e 6 mm, e comprimento de 0.2 m. Os testes foram conduzidos em inclinações que variáveis de -90° a $+90^\circ$. Os tubos de calor de ranhuras axiais não funcionavam em inclinações desfavoráveis.



Yasuko Shibano e Hiroyuki Ogawa, em 2015, estudaram desempenho térmico sob inclinações de tubos de calor de alumínio-amônia, de ranhuras axiais do tipo Ômega (Ω) e ranhuras retangulares, designados para aplicações espaciais. Os testes foram conduzidos em inclinações favoráveis de 0 (neutro), 5°, 30°, 60° e 90°. Os tubos utilizados tinham o comprimento de 1 m e diâmetro externo de 10 mm. As inclinações desfavoráveis não foram investigadas.

Bertoldo Junior, em 2017, conduziu um estudo com o objetivo de investigar o efeito da presença de gases não condensáveis em tubos de calor de alumínio, com ranhuras axiais, através de ensaios. A pesquisa foi delineada para compreender de que maneira esses fatores influenciam o desempenho desses dispositivos. Simultaneamente, foram elaboradas configurações experimentais com a finalidade de aprofundar a compreensão sobre o funcionamento dos tubos de calor em diferentes condições operacionais. Durante os ensaios, o autor escolheu empregar o uso de blocos de termistores em vez de termopares fixados ao longo do tubo de calor, para medir a temperatura. Essa abordagem inovadora aprimorou a precisão e facilitou a comparação de resultados entre tubos, promovendo eficiência na análise. Como resultado, essa metodologia, utilizando blocos de termistores, foi incorporada à pesquisa.

Bertoldo Junior, J. et al., em 2012, conduziram experimentos em dois tubos de calor de dimensões idênticas, apresentando uma altura de perfil de 19,1mm e um comprimento de 730 mm. O primeiro tubo, preenchido com acetona, possuía um núcleo único, enquanto o segundo, contendo amônia, apresentava dois núcleos. Este segundo tubo foi o mesmo empregado nos testes detalhados nos resultados. A abordagem adotada por Bertoldo Junior e sua equipe consistiu em conduzir testes de modo estático, manipulando a região do evaporador através do método conhecido como inclinação (tilting) com o intuito de analisar o desempenho do tubo de calor sob uma força de 1 G. No decorrer do artigo, os pesquisadores realizaram uma comparação entre os dois tubos, avaliando qual deles é mais sensível à inclinação.

O objetivo deste estudo é conduzir ensaios em laboratório, a fim de determinar a inclinação máxima desfavorável na qual um tubo de calor pode operar sem comprometer sua eficiência. Para os testes, foi utilizado um tubo de calor de alumínio com ranhuras, o qual é carregado com amônia. Ademais, são usados dois métodos diferentes, tanto estáticos quanto dinâmicos. Os resultados obtidos são então submetidos a uma análise para identificar com precisão o ponto em que o tubo de calor começa a perder sua eficiência. Esses dados são posteriormente comparados com resultados obtidos por intermédio dos cálculos de limite capilar, pelo método mais usado, que foi obtido por meio de uma revisão bibliográfica.

2. Metodologia

O objetivo dos testes realizados consistiu em determinar a inclinação máxima desfavorável, na qual o tubo de calor ainda pode operar eficientemente. Para realizar tais testes, foi seguido um protocolo da seguinte maneira: foi incrementada a inclinação em 0,1 grau na direção da zona de evaporação, resultando na redução da força capilar e o deslocamento da porção líquida do tubo em direção à extremidade oposta ao aquecedor. Após cada incremento na inclinação, foi mantido o tubo de calor em funcionamento nessa posição fixa por 20 minutos, a fim de atingir o regime permanente.

Para identificar o momento em que o tubo começa a perder eficiência, foi monitorado dois indicadores cruciais: o aumento da temperatura na região de evaporação e a interrupção do fluxo do fluido de trabalho, de tal forma que resulta em uma queda da temperatura na região do



condensador, aproximando-a da temperatura ambiente. Tal ponto de transição é registrado de forma gráfica por meio do programa Agilent Benchlink Data Logger.

Durante a fase de tratamento de dados, é importante notar que, a fim de comparar resultados de testes realizados em condições diferentes, foram utilizadas temperaturas relativas acima da temperatura ambiente. Contudo, a temperatura ambiente apresenta flutuações ao longo do tempo. Para eliminar as flutuações instantâneas, que são frequentemente causadas pelo movimento de ar no laboratório, foi aplicada uma suavização da temperatura ambiente, na qual foi seguida uma abordagem de ajuste de polinômio de 2 a 5 graus em função do tempo.

Tal suavização foi realizada por meio da ferramenta Excel, utilizando as medições experimentais da temperatura ambiente. A Figura 3 ilustra as oscilações de temperatura que ocorrem ao longo do experimento.

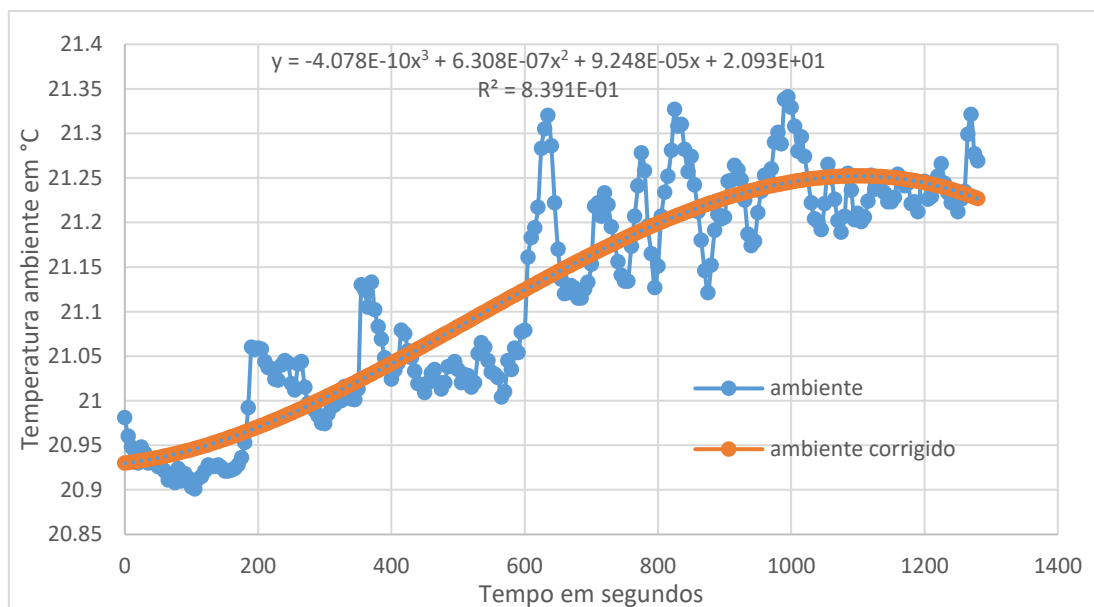


Figura 3 - Oscilações da temperatura ambiente durante a realização do ensaio.

Com essa suavização, uma coluna de aproximação da temperatura ambiental ($T_{amb, aprx}$) foi criada, a qual deve ser empregada no tratamento de dados em vez da temperatura ambiente experimental (T_{amb}). Durante a análise dos resultados dos testes, a temperatura suavizada foi subtraída daquelas que foram medidas no tubo de calor, com o objetivo de eliminar a variação causada pelas mudanças diárias, semanais e mensais na temperatura ambiente. Tal processo permitiu comparar os resultados dos testes realizados em diferentes datas, transformando as temperaturas medidas em temperaturas relativas ao ambiente ($\Delta T = T - T_{amb, aprx}$).

3. Resultados e Discussão

Os testes subsequentes foram conduzidos com algumas potências diferentes, de 15 W a 30 W. Durante tais testes, foi seguida uma diretriz que determinava a interrupção do teste quando a temperatura TH02 se aproximasse de 45° C. Tal consequência se deve ao fato de que a amônia apresenta um significativo aumento na pressão à medida que a temperatura aumenta, o que pode representar riscos.



3.1 Resultados dos ensaios de inclinação estática

O teste foi iniciado com uma inclinação desfavorável de 0,2 graus, conforme os parâmetros previamente mencionados. Cada teste foi realizado por um período de 20 minutos após a aplicação da inclinação desejada. A inclinação foi então aumentada em incrementos de 0,1 graus em cada teste subsequente, até que o ponto de "dry out" fosse alcançado. Os resultados dos ensaios são representados pela Tabela 1.

Tabela 1. Dados de Teste: Potência, Refrigeração e Inclinação que ocorre o fenômeno.

Ensaio	Potência (W)	Tipo de convecção	Inclinação Mínima para Dry Out
1	15	Convecção natural	0,80°
2	20	Convecção forçada	0,60°
3	25	Convecção forçada	0,60°
4	30	Convecção forçada	0,50°

A seguir será apresentado um dos gráficos obtidos dos ensaios com inclinação desfavorável, conforme representa a Tabela 1.

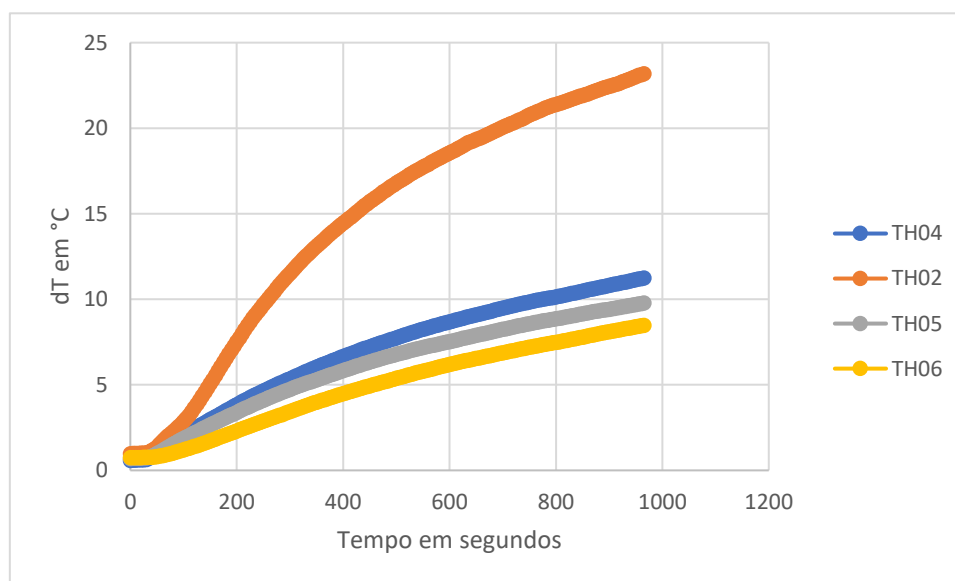


Figura 4 - Teste realizado com inclinação de 0,8° desfavoráveis, P=15W, aquecimento e convecção natural.

O gráfico ilustra as variações de temperatura no tubo de calor durante sua operação, destacando o fenômeno "dry out" induzido por inclinação. O tubo inicialmente funcionou, mas em torno de 180 segundos, ocorreu o "dry out parcial", seguido por um período em que a diferença de temperaturas entre o evaporador (TH02) e o condensador (TH04, 05 e 06) tornou-se inaceitavelmente alta.

3.2 Resultados dos ensaios de inclinação dinâmica

Também foram realizados testes de inclinações usando outro método: dinâmico. Ao contrário dos testes estáticos, nos quais a inclinação é fixada antes do início do experimento, nos ensaios



dinâmicos, os testes são iniciados na mesa motorizada a partir da inclinação neutra (0 grau) e gradualmente aumentados até alcançar o ponto de “dry out”. Além disso, o motor da mesa giratória foi ajustado para a potência mínima, de tal modo que atingisse a velocidade mínima angular.

A fim de contornar possíveis variações, durante o teste, foram registradas as inclinações em intervalos de um minuto e foram criadas as curvas de ângulo de inclinação em função do tempo. A Tabela 2 representa resultados destes ensaios.

Tabela 2. Dados de Teste: Potência, Refrigeração e Inclinação que ocorre o fenômeno.

Ensaio	Potência (W)	Tipo de convecção	Inclinação Mínima para Dry Out
1	15	Convecção natural	1,16°
2	30	Convecção natural	1,15°
3	30	Convecção forçada	0,95°

A seguir, será exibido um dos gráficos obtidos através do ensaio realizado conforme a Tabela 2.

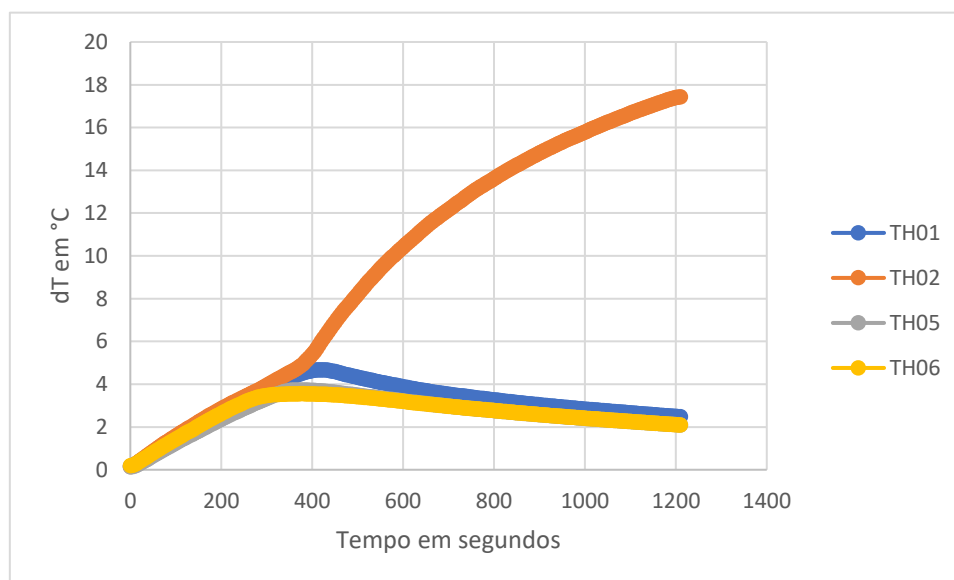


Figura 5 - Teste realizado com inclinação dinâmica (desfavorável), P = 15 W, aquecimento e convecção natural.

Neste gráfico, pode-se afirmar que o “dry out” foi completo, e momento de “dry out” é muito bem detectável por um disparo da temperatura do evaporador e pela queda da temperatura de condensador.

Os demais gráficos gerados a partir dos testes exibem notável semelhança, divergindo somente no ponto em que o fenômeno de “dry out” se manifesta.

3.3 Cálculos de “dry-out” teóricos

Com o propósito de comparar os resultados obtidos nos experimentos, foi conduzida uma análise teórica. Para realizá-la, uma calculadora térmica desenvolvida no ambiente MS Excel foi empregada, que foi concebida para determinar a eficiência de tubos de calor, permitindo aos



usuários que pudessem inserir dimensões, tipos de fluidos e outras características relevantes. É fundamental destacar que, nesses experimentos, foi empregado um tubo de calor com dois núcleos. No contexto do estudo teórico, foi avaliada a eficiência de um tubo semelhante, porém, com apenas um núcleo, a fim de efetuar essa comparação.

3.4 Comparação dos dados teóricos e experimentais

Para obter os dados teóricos, as fórmulas disponíveis no livro "Heat Pipe Theory and Practice", de Chi S.W., foram recorridas, sendo a fórmula específica apresentada abaixo. A metodologia apresentada neste livro é clássica, mas bem simplificada e, ainda, universal, usando o mesmo equacionamento para todos os tipos de ranhuras. As equações são apresentadas a seguir:

Tabela 3. Equações utilizadas para obter dados teóricos.

Equações	
1	$Q_{\max.c} = N_l G_f \frac{(2\cos\theta_{\min} \mp S(\sin\beta))}{\left(\frac{1}{K\varepsilon\pi\left(1 + \frac{\delta_p}{D_v}\right)} + \frac{128\delta_p^3 Y}{\pi D_v^3} \right)}$
2	$N_l = \frac{\sigma\lambda\rho_l}{\mu_l}$
3	$Y = \frac{\rho_l\mu_v}{\rho_v\mu_l}$
4	$S = \left(\frac{r_p\rho_l gL}{\sigma L_{eff}} \right)$
5	$G_f = \frac{D_v\delta_p}{L_{eff}r_p}$

A Tabela 4 fornece a nomenclatura de símbolos e suas respectivas unidades.

Tabela 4. Descrição de incógnitas presentes nas equações: significado e unidades de medida.

Incógnita	Descrição	Unidade
N_l	LTF - Fator de Transporte Líquido	W/m ²
G_f	Fator geométrico	-
θ	Ângulo de molhamento	graus
S	GSF – Fator sensível à gravidade	-



14° WETE

Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

β	Ângulo de inclinação	graus
$\delta\rho$	Altura da estrutura capilar	mm
D_v	Diâmetro do núcleo de vapor	mm
K	Permeabilidade	m^2
ε	Porosidade	-
σ	Tensão superficial	N/m
λ	Calor latente de evaporação	J/kg
ρ_l	Densidade líquida	kg/m^3
μ	Viscosidade dinâmica líquida	Pa s
μ_v	Viscosidade dinâmica de vapor	Pa s
ρ_v	Densidade do vapor	kg/m^3
r_p	Raio efetivo do poro	mm
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
L	Comprimento total	m
L_{cef}	Comprimento efetivo	m

A Figura 6 exibe um gráfico que ilustra os valores teóricos da eficiência do tubo de calor em diversas inclinações, sendo a linha em azul, a responsável por representar esses valores. Os pontos em laranja indicam os limites de eficiência do tubo, obtidos por meio de experimentos estáticos, conduzidos em laboratórios. Por sua vez, os pontos em cinza representam os limites operacionais do tubo de calor, os quais foram identificados durante testes dinâmicos.

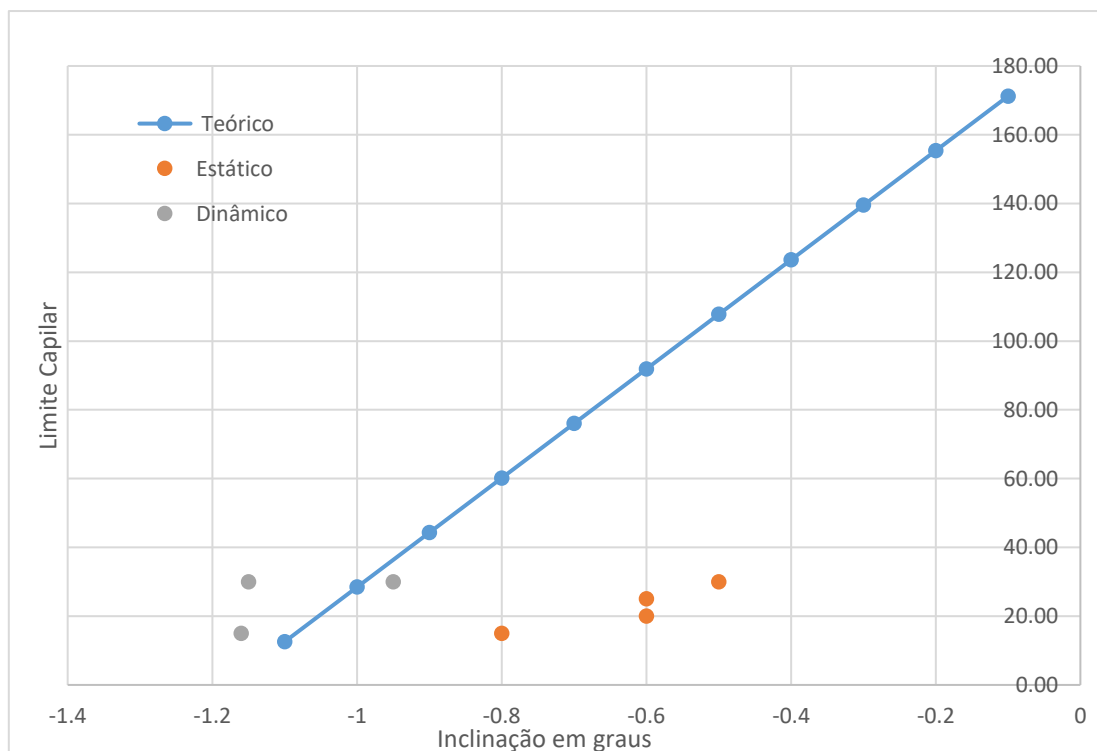


Figura 6 – Influência da inclinação no desempenho do tubo de calor.



Conforme demonstrado no gráfico do estudo teórico, o tubo de calor só perde completamente sua eficiência a partir de uma inclinação desfavorável de 1,2 graus, atingindo o limite capilar de 15 W a 30 W, que foi detectado por método dinâmico. No entanto, nos testes estáticos realizados em laboratório experimental, o início do “dry out” foi observado a partir de inclinações de apenas 0,5 graus desfavoráveis, ao passo que, nos estudos dinâmicos, o fenômeno de “dry out” ocorreu a partir de uma inclinação de 0,95 graus desfavoráveis.

Os resultados obtidos pelo método estático ficaram bem abaixo da curva teórica. Isto pode ser explicado pelo fato de que este método não detecta exatamente o “dry out” completo, e sim o “dry out” parcial. Os resultados provaram mais uma vez que o método dinâmico é mais precioso para testes de inclinação com tubos de calor ranhurados para obter limites capilares.

4. Conclusão

Diante da realização de ensaios em diferentes condições, abrangendo variações de inclinação, desde neutras até desfavoráveis, e a introdução de diferentes tipos de convecção, é possível destacar uma diferença significativa no desempenho do tubo de calor, por aproximar seu limite capilar. Tal procedimento enfatiza a influência direta da inclinação na eficiência da transferência de calor.

É notável que os ensaios dinâmicos se destacaram neste experimento, pois apresentam resultados mais próximos às teorias fundamentais de tubos de calor. O efeito inevitável da piscina de excesso do líquido, na parte inferior do tubo de calor com ranhuras axiais, dificulta detecção de “dry out” completo com precisão, pelo método estático.

À medida que o tubo de calor varia sua inclinação ao longo do tempo, a compreensão desse ângulo crítico torna-se crucial. Essa dinâmica destaca a importância de uma análise detalhada desse fator em projetos, pois mesmo pequenas variações na inclinação podem resultar em perda significativa de eficiência, potencialmente levando ao superaquecimento do objeto e causando danos.

Destarte, o presente estudo ressalta a importância de avaliar e compreender a influência da inclinação nas aplicações de tubos de calor. Os resultados obtidos foram satisfatórios, possibilitando uma base para estudos e projetos futuros e visando otimizar o desempenho e a confiabilidade de tais dispositivos em diversas condições de operação. No entanto, uma sugestão para futuras investigações seria conduzir ensaios por meio do uso de tubos de calor com geometrias diversas, em particular, perfis ômega, amplamente empregados em satélites. A geometria distinta de tais perfis exerce uma influência direta na força capilar, destacando-se pela maior capilaridade em comparação com os perfis retangulares. Por conseguinte, tal fator poderia potencialmente postergar o fenômeno “dry out”.

***Agradecimentos:** Agradeço ao programa PIBITI INPE por financiar essa valiosa oportunidade de pesquisa. Agradeço também a participação do co-orientador Rafael Lopes, bem como aos meus dedicados colegas da Divisão DIMEC e organizadores do evento WETE. Finalmente, agradeço apoio fundamental do CNPq durante minha Iniciação Científica no INPE.*



Referências

1. BERTOLDO JUNIOR, J. Estudo do Desempenho de Tubos de Calor de Alumínio Ranhurados na Presença de Gás Não Condensável Durante Testes Ambientais. Doctoral Thesis. – National Institute of Space Research, Brasil, 2017.
2. BERTOLDO JUNIOR, J. et al. Experimental performance comparison of axially grooved heat pipes charged with acetone and ammonia. Disponível em: <http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2012/11.28.01.57/doc/Paper_Bertoldo.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2023.
3. BERTOLDO JUNIOR, J.; VLASSOV, V.; GENARO G.; SANTOS, N.; CANDIDO, P. A. A Noninvasive Technique of Verification of Embedded Heat Pipes in Integrated Satellites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF HEAT PIPES FOR SPACE APPLICATIONS, 2.Moscow, Russia. Proceedigs... Moscow, 2014.
4. CAO, Y., FAGHRI, A. Analytical solutions of flow and heat transfer in a porous structure with partial heating and evaporation on the Upper surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 37, 10, 1525 – 1533, 1994.
5. CHI, S.W. Heat Pipe Theory and Practice, A Sourcebook, Hemisphere Publishing Corporation, 1976, pp.33-95.
6. CRISTIANO ENKE, JORGE BERTOLDO JÚNIOR, VALERI VLASSOV. Transient response of na axially-grooved, aluminum ammonia heat pipe with the presence of non-condensable gas. Applied Thermal Engineering, 183 (2021) 116136.
7. FAGHRI, A. Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, 1995; 2nd edition 2016.
8. GILMORE, D. G. Satellite Thermal Control Handbook, California, 1994.
9. JORGE BERTOLDO JUNIOR, VALERI V. VLASSOV, GINO GENARO, ULISSES TADEU VIEIRA GUEDES. Dynamic Test Method to determine the Capillary Limit of Axially Grooved Heat Pipes. Experimental Thermal and Fluid Science. ISSN 0894-1777. Volume 60, January 2015, Pages 290–2.
10. LOH, C.K., ENISA HARRIS AND CHOU, D.J. Comparative Study of Heat Pipes Performances in Different Orientations. Proc. of 21st IEEE SEMI-THERM Symposium, San Jose, CA, USA (2005) 1-5.
11. YASUKO SHIBANO AND HIROYUKI OGAWA. Thermal Behavior of Axial Grooved Heat Pipe under Gravity:Dependence of Groove Shape and Orientation. In: Proc. of 45th International Conference on Environmental Systems, ICES-2015-126, 12-16 July 2015, Bellevue, Washington, (2015).