



AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE UNIÃO POR DIFUSÃO DE COBRE APLICADOS À FABRICAÇÃO DE TUBOS DE CALOR PLANOS

Mendes, L.P.¹; Amaral, M.C.¹; Caldas, L.A.¹; Martins, B.M.¹; Domiciano, K.G.¹;
Krambeck, L.¹; Xavier, F.A.²; Mantelli, M.B.H.¹.

¹Laboratório de Tubos de Calor, Universidade Federal de Santa Catarina,
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

²Laboratório de Mecânica de Precisão, Universidade Federal de Santa Catarina,
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

larissa.mendes@labtucal.ufsc.br

RESUMO

Tubos de calor são dispositivos de transferência de calor que utilizam a mudança de fase de um fluido de trabalho para transportar calor de forma eficiente. Tubos de calor planos estão entre as melhores alternativas para o gerenciamento térmico de eletrônicos, devido ao melhor acoplamento e possibilidade de serem miniaturizados. A união por difusão destaca-se na fabricação desses dispositivos, produzindo soldas estanques sem apresentar macrodeformação plástica. Neste processo, a consolidação das superfícies ocorre em estado sólido, com a aplicação de temperatura, pressão e um período de tempo. O presente estudo investiga o impacto dos parâmetros termomecânicos na união do cobre eletrolítico para fabricação de tubos de calor, sendo variados os parâmetros de temperatura e pressão. As uniões foram avaliadas por meio da caracterização microestrutural e da resistência ao cisalhamento das juntas. Ademais, um tubo de calor foi fabricado e seu comportamento térmico caracterizado, qualificando a união por difusão para esta aplicação.

Palavras-chave: Soldagem por difusão, Tubos de calor, Cobre, Eletrônicos, Processos de união.

INTRODUÇÃO

Tubos de calor (TCs) são dispositivos passivos de transferência de calor que utilizam o fenômeno de mudança de fase de um fluido de trabalho para transportar calor passivamente de uma fonte quente para um sumidouro de calor (1). A fonte de calor pode ter diferentes geometrias, incluindo as planas, por exemplo os chips processadores de equipamentos eletrônicos. TCs são compostos por um invólucro, um fluido de trabalho e uma estrutura capilar, iniciando sua operação pela diferença de temperatura entre o evaporador e o condensador (2).

TCs podem ser fabricados a partir de placas planas e fios rígidos, resultando em dispositivos planos com estruturas capilares de ranhuras agudas (3). O cobre é o

material mais comumente utilizado devido a sua elevada condutividade térmica, o que intensifica a transferência de calor.

A fabricação dos TCs pode ser realizada pelo processo de união por difusão, que consiste em uma técnica de soldagem em estado sólido, sem a presença de uma zona fundida na interface de união, fenômeno típico das soldagens tradicionais (4,5). Neste processo, a formação de um componente monolítico ocorre por meio da difusão atômica entre as superfícies a serem unidas, sem a presença de deformação macroscópica significativa (6-8). Ademais, a união por difusão permite a soldagem completa de uma seção transversal, com ou sem geometrias internas, em um único processamento, sem apresentar uma zona termicamente afetada, embora o componente inteiro seja submetido a tratamento térmico (6).

A união por difusão ocorre por meio da difusão de átomos entre as superfícies, numa atmosfera de gás inerte ou vácuo, com temperaturas entre 50 e 80 % do ponto de fusão do metal puro ou do início do intervalo de fusão de uma liga. Os principais parâmetros envolvidos no processo são: tempo de união, temperatura, pressão e acabamento de superfície. Quando otimizados, podem resultar em dispositivos com propriedades mecânicas e microestruturais semelhantes às do material base (6,8-11). Desta forma, o processo de união por difusão facilita a soldagem de peças com geometrias complexas que exigem elevada qualidade, como em aplicações nucleares, automotivas e espaciais (6,8).

Estudos avaliando a união por difusão de ligas de cobre ainda são escassos na literatura, de modo que a definição de parâmetros adequados para a fabricação de mini tubos de calor de cobre é um desafio. Desta forma, o objetivo do presente trabalho é a otimização do processo de união por difusão do cobre eletrolítico, a partir da variação dos parâmetros de pressão e temperatura aplicado a fabricação de tubos de calor planos para gerenciamento térmico de equipamentos eletrônicos.

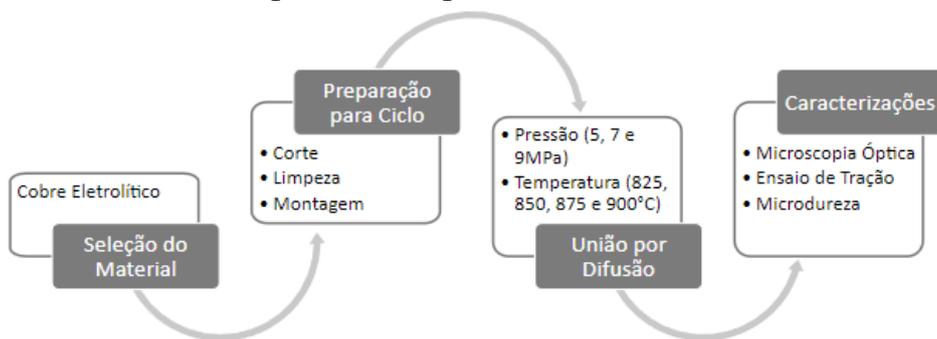
MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo, serão descritos os procedimentos de união por difusão e detalhadas as caracterizações mecânicas, de microdureza e microscopia óptica realizadas.

Seleção do Material e Corte das Amostras

O material utilizado neste estudo é o cobre C11000, também conhecido como cobre eletrolítico, adquirido na forma de chapas laminadas a frio, nas dimensões 1200 x 600 mm² e espessura 1 mm. Sua composição é de 99,9% de cobre, podendo ter um percentual residual de oxigênio e prata (12,13). A escolha deste material se dá por conta de sua elevada condutividade térmica, 394 W/m °C.

Figura 1 – Fluxograma das atividades



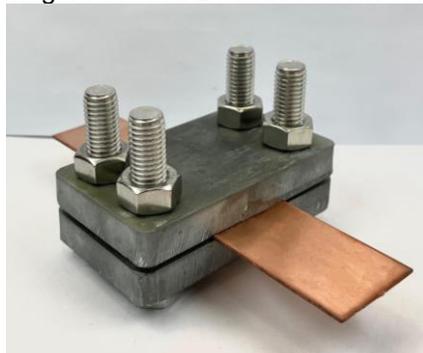
As chapas foram usinadas por corte com jato d'água, pelo equipamento Flow Waterjet® M2c 2030, instalado nas dependências do Labtucal, resultando em 48 corpos de prova (CPs) retangulares com dimensões de 3500 mm² (100 x 35 mm²).

Limpeza das chapas e Montagem dos Corpos de Prova

As chapas foram limpas por uma solução aquosa de ácido sulfúrico 10% em massa, para a retirada de óxidos presentes na superfície do cobre. Posteriormente, as chapas foram lixadas manualmente com lixa de carbetto de silício #220 *mesh*, submetidas a ultrassom em acetona por 15 minutos e secas em soprador de ar quente.

A aplicação de pressão nas amostras se deu por meio de torque submetido a quatro parafusos dispostos em uma matriz de Aço 304 (110 x 55 x 13,1 mm³), conforme Figura 2. Os parafusos utilizados foram de Aço 304 (Hexagonal M12).

Figura 2 – Imagem da matriz montada com corpo de prova



O cálculo da aplicação do torque foi realizado conforme os cálculos descritos por Krambeck (14). Os torques resultantes para cada condição de pressão são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de pressão e torque utilizados no estudo

Pressão (MPa)	Torque (N.m)
5	17,34
7	24,28
9	31,21

Ciclo térmico de união

Os ciclos térmicos foram realizados em forno tubular, Jung® LT1513/2009, com uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto até alcançar o patamar de união, sob uma atmosfera inerte (95% argônio e 5% hidrogênio) e uma vazão de 2 slpm. Após o ciclo, as amostras foram resfriadas em atmosfera inerte até atingirem 300 °C.

Neste estudo, foram variados os parâmetros de temperatura e tempo, conforme exposto na Tabela 2. Dois conjuntos foram unidos em cada ciclo, permitindo avaliar a reprodutibilidade dos resultados. Na Tabela 3 são apresentados os conjuntos formados a partir destes parâmetros, indicando as condições de união avaliadas.

Tabela 2 – Parâmetros de temperatura e pressão utilizados no estudo

Parâmetro	Intensidade			
Temperatura (°C)	825	850	875	900
Pressão (MPa)	5	7	9	

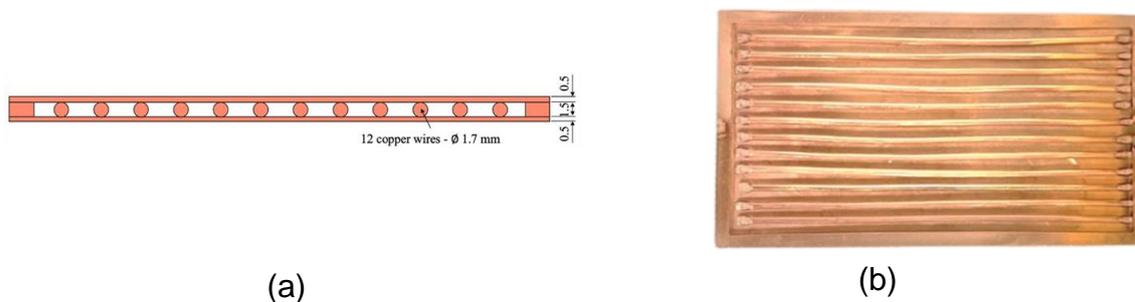
Tabela 3 – Nomenclatura dos conjuntos unidos

Condição	Nomenclatura	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)
1	A5825 - 1 e 2		5
2	A7825 - 1 e 2	825	7
3	A9825 - 1 e 2		9
4	A5850 - 1 e 2		5
5	A7850 - 1 e 2	850	7
6	A9850 - 1 e 2		9
7	A5875 - 1 e 2		5
8	A7875 - 1 e 2	875	7
9	A9875 - 1 e 2		9
10	A5900 - 1 e 2		5
11	A7900 - 1 e 2	900	7
12	A9900 - 1 e 2		9

Fabricação do tubo de calor plano de fios e placas

O tubo de calor proposto consiste em duas placas externas de cobre de 0,55 mm de espessura e uma armação usinada de cobre, com 1,5 mm de espessura. Doze fios de cobre sólidos com 1,7 mm de diâmetro foram fixados às chapas externas, formando canais com ranhuras agudas para o fluido de trabalho escoar, como mostrado na Figura 3. A cada fio de cobre forma-se quatro ranhuras, fornecendo alto bombeamento capilar ao fluido de trabalho.

Figura 3 – (a) Desenho esquemático da seção transversal (b) Estrutura interna do tubo de calor de fios e placas proposta



Após empilhado, o conjunto foi unido por difusão à uma temperatura de 875 °C (10 °C/minuto) por uma hora no forno tubular, em atmosfera inerte (95% argônio 5% hidrogênio), submetidas a uma pressão de 38 MPa em uma área de 930 mm², promovida por uma matriz com parafusos de aço inoxidável com torque de 100 Nm.

Caracterizações

Ensaio de Microdureza

Para avaliar a evolução da microdureza do material, realizou-se ensaios de microdureza Vickers nas amostras antes e depois dos ciclos térmicos de união. Para tal, foi utilizado um microdurômetro da marca DIGIMESS Instrumentos de Precisão modelo HV-1000. Em cada análise, as amostras foram submetidas a oito indentações sob carga de 0,1 Kg e tempo de 30 segundos.

Ensaio de Cisalhamento

Dada a geometria dos corpos de prova, a resistência mecânica dos conjuntos de amostras unidas por difusão foi avaliada por meio do ensaio de cisalhamento, onde a força é aplicada de forma paralela à linha de união. Os ensaios foram realizados em um MTS® Criterion 45, com velocidade de carregamento de 2 mm/min e à temperatura ambiente. A Figura 4 apresenta a geometria do corpo de prova com dimensão padronizada de 27 x 165 mm².

Figura 4 – Imagem do corpo de prova para ensaio de cisalhamento



Análise Microestrutural

Para avaliar a microestrutura resultante da união por difusão, fez-se a preparação e a análise metalográfica das amostras. O lixamento foi realizado em lixas de SiC de #600, #800, #1500 e #2000 *mesh*, seguido de polimento em pasta de diamante de 3 µm. O ataque químico foi feito por imersão em ácido nítrico PA durante 5 segundos. A aquisição das imagens das microestruturas foi realizada em microscópio óptico, MO Leica® DMAP, e foram obtidas imagens ao longo da região da linha de união para observar a migração dos contornos de grão na interface e os microconstituintes presentes.

Aparato experimental para testes térmicos

Um tubo de calor de fios e placas, bem como um aparato experimental foram confeccionados a fim de avaliar o desempenho térmico do tubo de calor. As principais características do tubo e as condições de teste são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Característica do tubo de calor de fios e placas

Parâmetro	Característica
Dimensões [mm ³]	100 x 55 x 2,79
Volume interno [ml]	4,60
Comprimento do Evaporador [mm]	14
Comprimento da Região Adiabática [mm]	71
Comprimento do Condensador [mm]	15
Fonte de calor	Bloco de cobre com um resistor elétrico
Sumidouro de calor	Água de resfriamento fornecida por um banho termostático (20 °C em uma vazão de 4 l/min)
Fluido de trabalho	0,6 ml de água destilada e deionizada

O aparato experimental consiste em uma fonte de potência por meio da qual aplicou-se cargas térmicas ao evaporador, começando em 10 W e aumentando em vários passos de 10 W, até atingir 100 °C. Temperaturas ao longo do tubo foram monitoradas por nove termopares, na qual um sistema de aquisição de dados (DAQ-NI® SCXI-1000) e um computador adquiriram 1 dado por segundo. O teste térmico foi realizado com o tubo na posição horizontal por dez minutos para cada carga térmica, assegurando regime permanente (variações de temperatura menores que 0,1 °C/min).

O desempenho térmico do tubo de calor pode ser avaliado pela resistência térmica, R , que corresponde à resistência do dispositivo em transportar calor da fonte quente para o sumidouro de calor. Quanto maior a dificuldade do tubo de calor em transportar calor, maior será a resistência térmica, calculado pela equação:

$$R = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_c}{q} \quad (A)$$

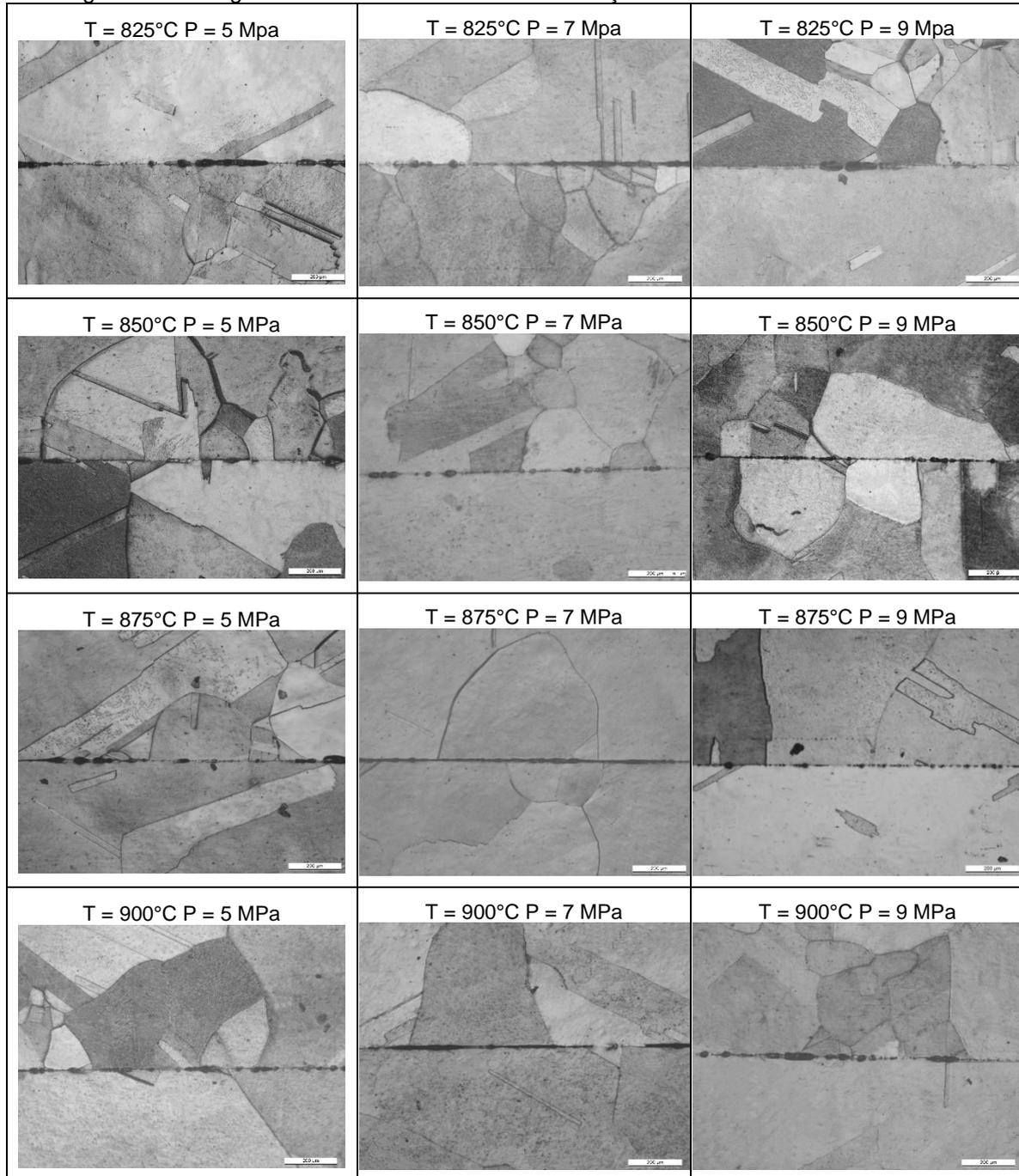
onde, q é a carga térmica aplicada ao evaporador e \bar{T}_e e \bar{T}_c são as temperaturas médias dos termopares do evaporador e do condensador, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise em microscopia óptica

Na Figura 5 são apresentadas as micrografias das interfaces de união, com uma magnitude de 100x e divididas em três colunas com a temperatura de 825 °C, 850 °C, 875 °C e 900 °C, e pressões 5, 7 e 9 MPa, respectivamente.

Figura 5 – Micrografias das linhas de união nas condições estudadas em aumento de 100x



De modo geral, não foi observada nas amostras a migração dos contornos de grão de uma interface a outra, indicando que não houve um preenchimento total dos vazios durante a etapa de difusão volumétrica em todas as uniões. Ademais, verifica-se a presença de maclas de recozimento e grãos bem definidos por todas as

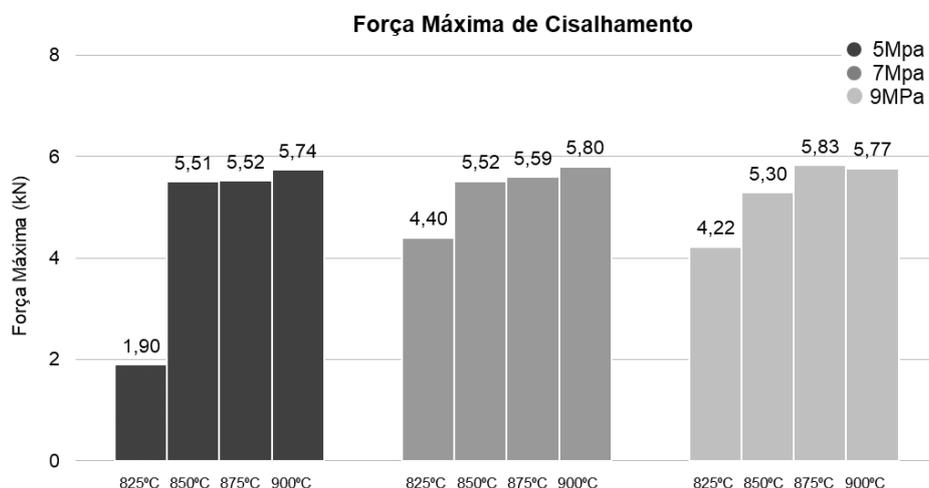
microestruturas. Morfologicamente, os defeitos são, em sua maioria, microscópicos, arredondados e presentes em todas as regiões da interface, sendo também observados defeitos mais alongados e contínuos em algumas regiões, os quais podem prejudicar a performance mecânica dos equipamentos em funcionamento, agindo como um ponto crítico para nucleação de trincas.

Em uma análise visual, as amostras unidas com pressão de 9 MPa, e temperatura de 875 e 900 °C, exibiram defeitos mais bem distribuídos e arredondados que as demais. O que pode indicar uma união por difusão mais efetiva. Em contrapartida, a condição com 7 MPa e temperatura de 875 e 900 °C mostraram defeitos ainda menores e menos contínuos que os anteriores.

Ensaio de Cisalhamento

A Figura 6 apresenta a média dos resultados de força máxima de cisalhamento atingidos pelas amostras unidas nas doze condições estudadas. As condições que suportaram as maiores forças de cisalhamento foram as de maior temperatura (900 °C) para todas as pressões, juntamente com a amostra de 9 MPa e 875 °C. As quatro condições apresentaram valores de força máxima similares dentro do desvio padrão, sendo observado em alguns casos o rompimento do corpo de prova na região do material de base.

Figura 6 – Resultados de cisalhamento de todas as condições estudadas



Por meio da análise desses resultados, pode-se observar que a temperatura exerceu uma maior influência na união por difusão, comparado a pressão aplicada.

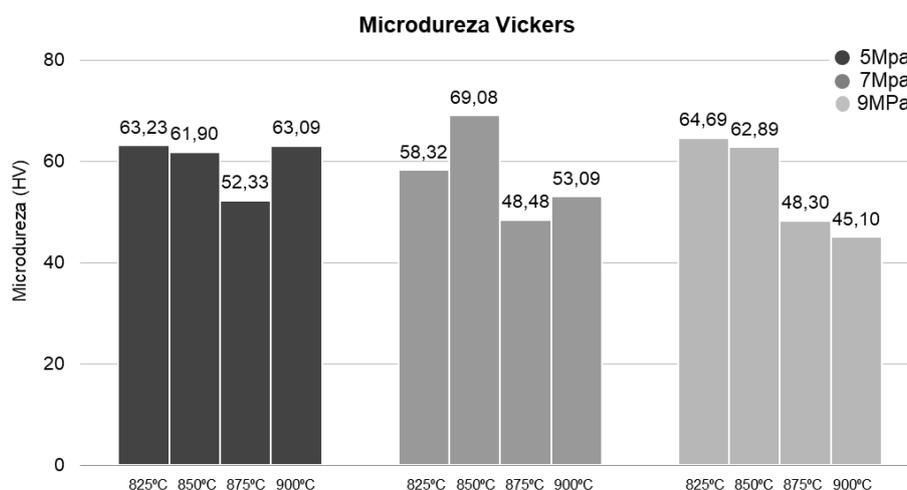
Para uma mesma temperatura, nota-se que os valores da força máxima suportada são similares ao variar a pressão de união aplicada, com exceção da temperatura de 825 °C que para a menor temperatura, a amostra com pressão de 5 MPa suportou a menor força de todas as condições - 1,90 kN.

Microdureza Vickers

A Figura 7 apresenta os resultados médios de microdureza Vickers realizado nas doze condições, sendo duas amostras para cada condição.

Os materiais de base apresentaram uma microdureza média de 107 HV. Já em comparação com os resultados após os ciclos de união, pode-se perceber um aumento dos valores de microdureza com a diminuição da temperatura de união. Observa-se resultados médios superiores a 60 HV para as temperaturas de 850 °C e 825 °C, enquanto para as maiores temperaturas (875 °C e 900 °C), tem-se valores médios próximos a 50 HV. Isto pode ser explicado devido ao processo de união por difusão dos conjuntos terem sido realizados com aquecimento de forma controlada somado a um resfriamento lento, caracterizando-o como um recozimento do cobre. Este recozimento se mostrou mais eficaz em temperaturas maiores, o que pode ter causado um refino de grão na microestrutura do material unido e, conseqüentemente, uma sutil redução da dureza nessas condições.

Figura 7 – Resultados de microdureza de todas as condições estudadas



Resultados térmicos do tubo de calor

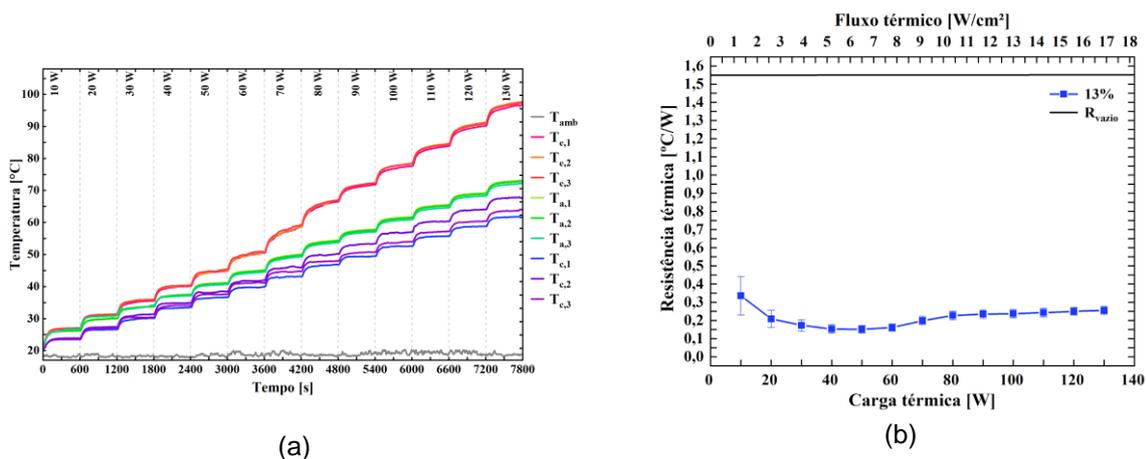
A Figura 8 mostra a distribuição de temperaturas do tubo de calor ranhurado durante o teste térmico. As temperaturas sobem assim que as cargas térmicas são

aplicadas, atingindo condições de regime permanente em todos os casos. A proximidade das temperaturas do evaporador, região adiabática e condensador comprovam a elevada capacidade em transportar calor por todo o comprimento do dispositivo. O afastamento das temperaturas do evaporador, a partir do 70 W, mostra o início da secagem do evaporador, ou seja, a quantidade de líquido que retorna ao evaporador é menor que quantidade consumida na evaporação, resultando no aumento da temperatura da região do evaporador. Apesar disso, o tubo de calor continua operando, porém com uma eficiência menor.

Figura 9 mostra as resistências térmicas do tubo para cargas de 10 a 130 W. O valor médio da resistência térmica do dispositivo vazio (R_{vazio}), ou seja, operando somente por condução, é apresentado no mesmo gráfico. A resistência térmica do tubo de calor reduziu drasticamente em relação ao dispositivo vazio, demonstrando a elevada eficiência do tubo de calor desenvolvido.

Os resultados térmicos do tubo de calor mostraram que ele funcionou com sucesso, principalmente para o intervalo de cargas térmicas de 10 a 60 W. Desta forma, o processo de união por difusão de cobre mostrou grande potencial na fabricação de mini tubos de calor propostos para o gerenciamento térmico de equipamentos eletrônicos.

Figura 8 – (a) Distribuição de temperaturas do tubo de calor durante o teste térmico e (b) Resistência térmica do tubo de calor de fios e placas



CONCLUSÃO

O processo de união por difusão do cobre eletrolítico foi bem-sucedido. A partir dos resultados de microscopia óptica obtidos, pode-se concluir que as melhores condições foram as pressões de 7 e 9 MPa e as temperaturas de 875 e 900 °C, onde os defeitos dispersos pela interface de união se mostraram bem arredondados e

distribuídos, com certa migração de grão através da linha de união. Os resultados de cisalhamento corroboram com esses resultados, visto que essas mesmas condições suportaram uma força máxima de cisalhamento maior, indicando que a pressão e temperatura foram suficientes para a união por difusão do material. Entretanto, em virtude da maior temperatura aplicada nessas condições, a microdureza resultante do material foi menor, devido ao recozimento do cobre. No entanto, tais resultados não prejudicam a aplicação final em tubos de calor planos, uma vez que não é necessária uma resistência mecânica muito elevada para o funcionamento adequado do tubo. Termicamente, o tubo de calor testado nas condições de união escolhidas apresentou resultados satisfatórios para o gerenciamento térmico de equipamentos eletrônicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Capes, LMP e Labmat pelo fornecimento do uso de diversos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- (1) PETERSON, G. P. An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Applications. New York, USA: Wiley-Interscience, 1994.
- (2) MANTELLI, M. B. H. Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications. Springer International Publishing, 2021.
- (3) PAIVA, K. V. DE; BARBOSA, M.; SLONGO, L. K. Thermal Behavior Analysis of Wire Mini Heat Pipe. *Journal of Heat Transfer*, v. 133, n. 12, p. 9, 2011.
- (4) GOULD, J. E. Mechanisms of bonding for solid-state welding processes. Em: *ASM Handbook: Welding Fundamentals and Processes*. v. 6Ap. 89–97.
- (5) MAHONEY, M. W.; BAMPTON, C. C. Fundamentals of Diffusion Bonding*. Em: *ASM Handbook: Welding Fundamentals and Processes*. 2011. v. 6Ap. 217–221.
- (6) DERBY, B.; WALLACH, E. R. Joining methods in space: A theoretical model for diffusion bonding. *Acta Astronautica*, v. 7, n. 4–5, p. 685–698, 1980.
- (7) GIETZELT, T.; TOTH, V.; HUELL, A. Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and Material Microstructure. Em: TOTH, V. (Ed.). *Joining Technologies*. Rijeka: IntechOpen, 2016. p. Ch.9.
- (8) LEE, H.-S. Diffusion bonding of metal alloys in aerospace and other applications. Em: *Welding and Joining of Aerospace Materials*. Elsevier, 2012. p. 320–344.
- (9) DUNKERTON, S. B. Diffusion Bonding. Em: LIENERT, T. et al. (Eds.). *ASM*

Handbook: Welding Fundamentals and Processes. v. 6Ap. 682–689.

(10) KAZAKOV, N. F. Diffusion Bonding of Materials. Moscou: v. 1 1985.

(11) MORTEAN, M. Desenvolvimento de Tecnologia de Recheios para Trocadores de Calor Compactos Soldados por Difusão. 2014.

(12) COPPERMETAL. Tudo sobre o tubo de cobre eletrolítico - Coppermetal. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/blog/tubo-de-cobre-eletrolitico>. 2024.

(13) ASTM B152/B152M-19 Standard Specification for Copper Sheet, Strip, Plate, and Rolled Bar, 2024

(14) KRAMBECK, Larissa. Flat mini heat pipe technologies for the thermal management of electronics. Tese - Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2024.

EVALUATION OF COPPER DIFFUSION BONDING PARAMETERS APPLIED TO THE MANUFACTURE OF FLAT HEAT PIPES

ABSTRACT

Heat pipes are heat transfer devices that utilize the phase change of a working fluid to efficiently transport heat. Flat heat pipes are among the best alternatives for the thermal management of electronics, due to their better coupling and the possibility of being miniaturized. Diffusion bonding stands out in the manufacturing of these devices, producing leak-proof joints with no significant plastic deformation. In this process, the consolidation of surfaces occurs in a solid state, with the application of temperature and pressure in a given amount of time period. The present study investigates the impact of thermomechanical parameters (temperature and pressure) on the bonding of electrolytic copper for the heat pipe manufacturing. The joints were evaluated through microstructural characterization and shear strength testing. Furthermore, a heat pipe was manufactured and its thermal behavior characterized, qualifying the diffusion bonding for this application.

Keywords: Diffusion welding, Heat pipes, Copper, Electronics, Bonding processes.