THIAGO CAPELETTI

**ESTUDO DA BRASABILIDADE DE CONTATOS ELÉTRICOS POR
METAL DE ADIÇÃO 40% Ag-21% Zn-20% Cd-19% Cu**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título
de Mestre em Engenharia.

São Paulo

2008

THIAGO CAPELETTI

Engenheiro Mecânico, Escola de Engenharia Mauá, 2002.

**ESTUDO DA BRASABILIDADE DE CONTATOS ELÉTRICOS POR
METAL DE ADIÇÃO 40% Ag-21% Zn-20% Cd-19% Cu**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título
de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

2008

Ficha Catalográfica

Thiago Capeletti.

Estudo da brasabilidade de contatos elétricos por metal de adição 40%Ag-21%Zn-20%Cd-19%Cu / Thiago Capeletti – São Paulo, 2008.

129 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Contatos elétricos. 2. Prata-óxido de estanho. 3. Brasabilidade.

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia e de Materiais. II D

EPÍGRAFE

“Creio em mim mesmo.

Creio nos que trabalham comigo, creio nos meus amigos e creio
na minha família.

Creio que Deus me emprestará tudo que necessito para triunfar,
contanto que eu me esforce para alcançar com meios lícitos e
honestos.

Creio nas orações e nunca fecharei meus olhos para dormir, sem
pedir antes a devida orientação a fim de ser paciente com os
outros e tolerante com os que não acreditam no que eu acredito.

Creio que o triunfo é resultado de esforço inteligente, que não
depende da sorte, da magia, de amigos, companheiros
duvidosos ou de meu chefe.

Creio que tirarei da vida exatamente o que nela colocar.

Serei cauteloso quando tratar os outros, como quero que eles
sejam comigo.

Não caluniarei aqueles que não gosto.

Não diminuirei meu trabalho por ver que os outros o fazem.

Prestarei o melhor serviço de que sou capaz, porque jurei a mim
mesmo triunfar na vida, e sei que o triunfo é sempre resultado
do esforço consciente e eficaz.

Finalmente, perdoarei os que me ofendem, porque compreendo
que às vezes ofendo os outros e necessito de perdão”.

Mahatma Gandhi

DEDICATÓRIA

Ao meu pai e à minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas me ajudaram, direta ou indiretamente, na conclusão deste trabalho.

Inicialmente, agradeço aos meus pais pela rígida base familiar, carinho e educação que sempre me impulsionaram a agarrar meus sonhos e desejos. Neles, Deus sempre se faz presente.

Agradeço ao direcionamento e paciência recíproca, de meu amigo e orientador Prof. Dr.Sérgio Duarte Brandi.

À presidência e diretoria das empresas: Recontel Reposição de Contatos Elétricos Ltda. e Indústria Metalquímica Kels Ltda., pela confiança e fornecimento do material necessário para a realização dos ensaios.

Às ajudas e orientações técnicas cedidas por todos os amigos e técnicos do PMT, e também de outros laboratórios “vizinhos”.

À grande paciência e colaboração de minha futura esposa, nos diversos momentos atribulados desta dissertação.

Às minhas irmãs pela preocupação despendida.

E a todos os meus familiares e amigos próximos que permaneceram, e ainda permanecem, na torcida.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Desempenho de um contato elétrico em prata-óxido de zinco (92Ag-8ZnO) comparado com outros óxidos metálicos, sob carga resistiva, capacitiva e indutiva ⁽⁹⁾	10
FIGURA 2.2 – (a) Pastilhas de contato elétrico, (b) Bases para contato elétrico.....	15
FIGURA 2.3 – (a) Tarugos e pastilhas de tungstênio-cobre, (b) Pastilhas de tungstênio-prata, (c) Lâminas de prata-óxido de cádmio, (d) Pastilhas de prata-óxido de cádmio.....	17
FIGURA 2.4 – (a) Rebites de prata pura + base de cobre, (b) Rebites de prata pura + base de cobre, aplicado banho eletrolítico prateado.....	17
FIGURA 2.5 - (I) Rota para a confecção de contatos elétricos através do processamento de pó de prata + pó do óxido metálico; (II) Rota para a confecção de contatos elétricos através do processamento de pó de prata + pó metálico ⁽¹⁰⁾	18
FIGURA 2.6 - (III) Rota para a confecção de contatos elétricos através do processo de fundição da Prata Granulada + Metal Granulado ⁽¹⁰⁾	19
FIGURA 2.7 - Esquema ilustrativo representando as três camadas em uma pastilha/lâmina de contato elétrico.....	21
FIGURA 2.8 - Diagrama dos processos de brasagem ⁽²⁴⁾	23
FIGURA 2.9 - Maçarico + acessórios, para a realização de brasagem oxiacetilênica ou por chama.....	24
FIGURA 2.10 - Maquinário de 45 kVA utilizado para realização de brasagem por resistência.....	26
FIGURA 2.11 - Esquema de forno contínuo com resfriamento a jatos de água ⁽²⁴⁾	27
FIGURA 2.12 - Forças de atração entre moléculas da superfície e do interior de um líquido, para uma interface plana líquido-vapor ⁽³²⁾	30
FIGURA 2.13 - Equilíbrio estático de uma gota líquida apresentando a linha de contato entre o líquido e a horizontal. Além da formação das interfaces: sólido-líquido, líquido-vapor e sólido-vapor ⁽³²⁾	30
FIGURA 2.14 - Exemplo de molhamento espontâneo (a) e molhamento forçado (b) ⁽²⁹⁾	31
FIGURA 2.15 - Esquema dos perfis assumidos por um cilindro sólido que se funde para formar a gota sésil, com ângulo de contato inicial de 120°, que se espalha sobre o substrato, exibindo os ângulos de contato transientes até atingir o ângulo de contato final de equilíbrio, $\theta_F = 30^\circ$ ^(29, 35)	34

FIGURA 2.16 – Representação da elevação do fluido por um tubo de raio r até uma altura máxima h , gerando um menisco positivo devido às forças de capilaridade ⁽³⁶⁾	37
FIGURA 2.17 - Representação esquemática do método de máxima pressão da bolha ⁽³⁶⁾	39
FIGURA 2.18 - (a) Imagem de gota pendente apresentando os parâmetros: diâmetro equatorial (d_e) e do diâmetro d_s , encontrado a partir da base da gota, a uma distância d_e ⁽³⁶⁾	41
FIGURA 2.19 - Diversas técnicas para a realização do ensaio da gota séssil: (a) Técnica clássica, (b) Apresentando a formação de uma liga durante o ensaio, (c) Liberação de uma gota suspensa, (d) Gota transferida, (e) Gota molhando dois substratos, (f) Ensaio existindo uma inclinação da base ⁽²⁹⁾	42
FIGURA 2.20 - Perfil da gota séssil mostrando as cotas utilizadas para encontrar os valores da tensão superficial. Os principais raios de curvatura são: $R_1 = QK$ e $R_2 = QP$ ⁽²⁹⁾	43
FIGURA 2.21 - Desenho esquemático de uma balança de Wilhelmy ⁽²⁹⁾	45
FIGURA 2.22 - Influência do espaçamento da junta sobre a tensão de cisalhamento ⁽²⁴⁾	46
FIGURA 2.23 – Corte do diagrama de fases quartenário para o sistema 40Ag-Cu-Zn-Cd ⁽³⁸⁾	52
FIGURA 2.24 - Esquema ilustrativo da montagem e realização de um ensaio de ascensão capilar com junta em “V”	60
FIGURA 2.25 - Esquema ilustrativo da montagem de um ensaio da cunha	61
FIGURA 2.26 - (a) Junta brasada sem a precipitação de fase eutética; (b) Junta brasada com a precipitação contínua de fase eutética ⁽³⁷⁾	62
FIGURA 4.1 – Maquinário vibratório carregado com esferas de 4 mm de diâmetro	69
FIGURA 4.2 - Corpos de prova em (a) latão e (b) cobre prontos para serem ensaiados	73
FIGURA 4.3 - Corpo de prova para o ensaio da cunha; (a) amostra em: latão / prata pura, mais duas lâminas do metal de adição, desmontados e protegidos com fluxo, (b) amostra em: cobre / prata pura, após montagem	73
FIGURA 4.4 – Suporte em cobre eletrolítico utilizado para a realização dos ensaios da gota séssil e da cunha	74
FIGURA 4.5 – Máquina de brasagem por resistência utilizada para realização dos ensaios	75

FIGURA 4.6 – Suporte (X) montado sobre o bloco de eletrografite (Y) e pressionado pneumaticamente pelo eletrodo móvel superior (B) e o eletrodo fixo inferior (C).....	76
FIGURA 4.7 – Registrador de temperaturas XY – HP e termômetro digital para termopares J e K.....	79
FIGURA 4.8 – Demonstração gráfica dos parâmetros obtidos das curvas <i>temperatura x tempo</i> , para ambos os ensaios.....	80
FIGURA 4.9 – Esquema do espalhamento para ensaio da gota sésil, sendo: (a) d_p = diâmetro da pastilha de metal de adição; (b) d_0 = diâmetro inicial fundido e (c) d_f = diâmetro final solidificado.....	82
FIGURA 4.10 – Esquema das medições realizadas para obtenção do diâmetro final solidificado (d_f).....	83
FIGURA 4.11 – Esquema das medições do ângulo de contato (θ_1 e θ_2), altura da gota (h) e raio da calota esférica (r).....	84
FIGURA 5.1 - (a) Forno elétrico tipo mufla com atmosfera de argônio; (b) forno elétrico a vácuo com atmosfera de argônio purificado, utilizados para a realização de ensaios preliminares.....	90
FIGURA 5.2 – Fotografia na linha de contato do ensaio da gota sésil empregando (a) cobre eletrolítico e (b) latão (MEV).....	96
FIGURA 5.3 Fotografia na linha de contato do ensaio da gota sésil empregando (a) prata pura; (b) e prata + 10% SnO ₂ (MEV).....	96
FIGURA 5.4 – Imagem de amostra do ensaio da gota sésil em metal de base prata-óxido de estanho.....	98
FIGURA 5.5 – Imagem aumentada do ensaio da gota sésil em metal de base prata-óxido de estanho apresentado regiões demolhadas.....	98
FIGURA 5.6 – Imagem aumentada do ensaio da gota sésil em metais de base: (a) cobre; (b) Latão e (c) prata pura.....	99
FIGURA 5.7 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da gota sésil – metal de base: cobre eletrolítico.....	101
FIGURA 5.8 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da gota sésil – metal de base: latão.....	102
FIGURA 5.9 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da gota sésil – metal de base: prata pura.....	103

FIGURA 5.10 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da gota sésil – metal de base: prata-óxido de estanho.....	104
FIGURA 5.11 – Gráfico de barras apresentando os valores de desvio máximo, média e desvio mínimo para o superaquecimento (ΔT) dos ciclos C1, C2 e C3 para as amostras do ensaio da cunha e da gota sésil.....	108
FIGURA 5.12 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da cunha – metal de base: cobre / prata pura.....	111
FIGURA 5.13 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da cunha – metal de base: cobre / prata-óxido de estanho.....	112
FIGURA 5.14 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da cunha – metal de base: latão / prata pura.....	113
FIGURA 5.15 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da cunha – metal de base: latão / prata-óxido de estanho.....	114
FIGURA 5.16 – Microscopia do ensaio da cunha para Cu / AgSnO ₂ , identificando: e_{Cu} , e_{Latao} , e_{Ag} , e_{AgSnO_2} (MEV).....	115
FIGURA 5.17 – Esquema ilustrativo da obtenção da folga máxima ideal.....	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Ligas de prata frequentemente utilizadas para contatos elétricos ⁽⁷⁾	6
TABELA 2.2 - Propriedades de contatos elétricos semi-refratários ⁽⁷⁾	8
TABELA 2.3 - Ligas comerciais para contatos elétricos em tungstênio-prata ^(3, 15)	13
TABELA 2.4 - Ligas comerciais para contatos elétricos em tungstênio-cobre ⁽¹⁰⁾	14
TABELA 2.5 - Resistividade dos principais metais utilizados em contatos elétricos ⁽²³⁾	16
TABELA 2.6 - Folgas recomendadas para brasagem de alguns metais e suas ligas ⁽²⁵⁾ ...	47
TABELA 2.7 - Classificação AWS para metais de adição para brasagem ⁽²⁷⁾	50
TABELA 2.8 - Metais de adição comercialmente disponíveis, à base de prata ⁽²⁴⁾	51
TABELA 2.9 – Composição química das fases prováveis para a liga 40%Ag-20%Cu-20%Zn-20%Cd ⁽³⁸⁾ , na temperatura de 615°C.....	52
TABELA 2.10 - Fluxos classificados pela AWS e suas características ⁽²⁴⁾	54
TABELA 4.1 – Composição química da liga CA-11000 utilizada.....	65
TABELA 4.2 – Composição química da liga CA-26800 utilizada.....	66
TABELA 4.3 – Composição química nominal do metal de adição utilizado.....	70
TABELA 4.4 – Propriedades gerais do bloco de eletrografite utilizado.....	77
TABELA 4.5 – Parâmetros gerais da máquina manual de brasagem por resistência.....	78
TABELA 4.6 – Quantificação dos ensaios e amostras produzidas.....	81
TABELA 5.1 – Ciclo térmico do ensaio da gota sésil para C_1	86
TABELA 5.2 – Ciclo térmico do ensaio da gota sésil para C_2	87
TABELA 5.3 – Ciclo térmico do ensaio da gota sésil para C_3	87
TABELA 5.4 - Quadro da análise ANOVA para ΔT das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da gota sésil dos quatro metais de base.....	88
TABELA 5.5 - Quadro da análise ANOVA para t das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da gota sésil dos quatro metais de base.....	88
TABELA 5.6 – Massas e temperaturas para ensaios da gota sésil.....	89

TABELA 5.7 – Perdas de massa em amostras da gota sésil para forno a vácuo.....	91
TABELA 5.8 – Diâmetros finais solidificados (d_f), ângulos de contato teóricos (θ_i) e coeficientes de espalhamento, para ensaios da gota sésil.....	92
TABELA 5.9 - Quadro da análise ANOVA para o ângulo de contato calculado teoricamente (θ_i) das condições C_1 , C_2 e C_3 , para os ensaios da gota sésil, em: cobre, latão e prata pura.....	93
TABELA 5.10 – Dados das constantes de difusão e cálculo da distância de difusão de diferentes pares de elementos presentes nos ensaios de brasabilidade ⁽⁴¹⁾	94
TABELA 5.11 – Tensão superficial líquido vapor para os elementos que compõe a adição de brasagem na temperatura de fusão do Cu (1083 °C) ⁽⁴²⁾	95
TABELA 5.12 – Solubilidade sólida máxima e composição do líquido em equilíbrio do Cu, Zn e do Cd na Ag na temperatura média dos ensaios de caracterização da brasabilidade (730°C) ⁽⁴³⁾	95
TABELA 5.13 – Composição química de região do halo que circunda a gota, para o cobre eletrolítico como substrato.....	100
TABELA 5.14 - Quadro de composições químicas e fases, fornecida pela literatura ⁽³⁸⁻⁴⁰⁾	101
TABELA 5.15 – Ciclo térmico do ensaio da cunha para C_1	104
TABELA 5.16 – Ciclo térmico do ensaio da cunha para C_2	105
TABELA 5.17 – Ciclo térmico do ensaio da cunha para C_3	106
TABELA 5.18 - Quadro da análise ANOVA para ΔT das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da cunha, em: cobre / prata pura e latão / prata pura.....	106
TABELA 5.19 - Quadro da análise ANOVA para ΔT das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da cunha, em: cobre / prata-óxido de estanho e latão / prata-óxido de estanho...	107
TABELA 5.20 - Quadro da análise ANOVA para t das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da cunha, em: cobre / prata pura e latão / prata pura.....	107
TABELA 5.21 - Quadro da análise ANOVA para t das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da cunha, em: cobre / prata-óxido de estanho e latão / prata-óxido de estanho...	107
TABELA 5.22 – Massas e temperaturas para ensaios da cunha.....	109
TABELA 5.23 – Espessuras e_{Cu} , $e_{Latão}$, e_{Ag} , e_{AgSnO_2} para cálculo da folga máxima ideal.....	116
TABELA 5.24 – Espessuras e_{Cu} , $e_{Latão}$, e_{Ag} , e_{AgSnO_2} para cálculo da folga máxima ideal.	117

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
IACS	<i>International Annealed Cooper Standard</i>
M/P	Metalurgia do pó
AWS	<i>American Welding Society</i>
T_F	Temperatura de fusão
θ	Ângulo de Contato
F	Energia livre de Helmholtz
E	Energia interna
S	Entropia
T	Temperatura
P_1, P_2	Pressão
V_1, V_2	Volume
ρ	Densidade
g	Aceleração da gravidade
H	Entalpia
μ_i	Viscosidade
n_i	Número de mols na interface
γ_i	Tensão superficial
A_i	Área
c_1, c_2	Curvaturas da calota de uma gota
k_1, k_2	Constantes
γ_{SV}	Tensão superficial sólido-vapor
γ_{SL}	Tensão superficial sólido-líquido
γ_{LV}	Tensão superficial líquido-vapor
A_{SV}	Área sólido-vapor
A_{SL}	Área sólido-líquido
A_{LV}	Área líquido-vapor
v_e	Velocidade de espalhamento do metal de adição
e	Abertura ou folga da junta
x	Comprimento da junta ou comprimento de brasagem
% at.	Porcentagem atômica
h	Altura
de	Diâmetro equatorial
ds	Diâmetro localizado a partir de de
Z90	Distância vertical a partir da origem $\underline{Q}$
C	Comprimento
L	Largura
W	Força
t	tempo

RESUMO

Contatos elétricos são aplicados na área de geração, manuseio e distribuição de energia elétrica, sendo fabricados em metais condutores como: cobre eletrolítico e suas ligas. Através de alguns métodos de brasagem, pastilhas com propriedades de condutividade, elétrica e térmica, mais apuradas são brasadas sobre estas bases condutoras. Em função da substituição do cádmio por um elemento menos nocivo ao homem e ao meio ambiente, o estanho vem se difundindo com rapidez, apoiado por iniciativas internacionais. O objetivo deste trabalho é avaliar a brasabilidade de um metal de adição na liga 40%Ag-21%Zn-20%Cd-19%Cu, sobre metais de base em: cobre eletrolítico, latão (65%Cu-35%Zn), prata pura e prata-óxido de estanho (90%Ag-10%SnO₂) através dos ensaios da gota sésil e da cunha. As amostras foram caracterizadas metalograficamente. Os resultados mostraram que a brasabilidade para todos os substratos empregados estava dentro de valores de ângulo de contato menores que 10°, com exceção do substrato prata-óxido de estanho. Para este material ocorreu o demolhamento, dificultando a caracterização da sua molhabilidade.

ABSTRACT

Electrical contacts are manufactured with conductive metals, like electrolytic copper and its alloys. These products are used in electric circuits to manage the electrical energy. Electrical contacts assemblies can be built up by brazing joining methods, which improves electrical and thermal conductivity in non-ferrous substrates. The cadmium oxide, present into electrical contact alloys, has been replaced by tin oxide due to environmental issues, to meet the actual international agreements. The objective of this work is to evaluate the brazeability of a filler metal 40%Ag-21%Zn-20%Cu-19%Ni, on non-ferrous substrates, like: electrolytic copper, brass (65%Cu-35%Zn), silver and silver tin-oxide (90%Ag-10%SnO₂) using sessile drop and edge tests. The results showed that the brazeability of all non-ferrous substrates depicted contact angles less than 10°, except for the silver-tin oxide substrate. For silver-tin oxide substrate dewetting took place and the measurement of contact angles was impossible.

JUSTIFICATIVA

A preocupação sócio-ambiental e o bem estar das futuras gerações do planeta vem ocasionando uma corrida pela substituição de materiais e rejeitos, os quais resultam na diminuição de nossa qualidade de vida e na degradação do meio ambiente.

Em 2004, países da União Européia produziram cerca de 9,7 milhões de lixo eletrônico, dobrando esta quantidade a cada 10 anos. Além disso, produtos da linha branca representam 40% (3,8 milhões de toneladas) deste volume de rejeitos ^(1,2).

Este fator, na contra mão da expansão industrial e do aumento do consumo energético, impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais que venham a se enquadrar nesta nova realidade.

Assim, produtos e equipamentos eletrodomésticos, equipamentos de informática, ferramentas elétricas e eletrônicas, equipamentos de iluminação, brinquedos, soldas, cabos elétricos, contatos elétricos, aplicação de tratamentos superficiais, dentre outro possuem elementos químicos ou substâncias prejudiciais ao meio ambiente. Dentre estes elementos pode-se citar: chumbo, cádmio, mercúrio, cromo hexavalente e retardantes à chama como: bifenilas polibromadas (PBB) e éteres de bifenilas polibromadas (PBDE). Estes deverão ser substituídos gradativamente por outras substâncias similares bem menos agressivas ou deverão ter suas porcentagens reduzidas, seguindo normas internacionais.

Estes elementos são de grande toxicidade tanto para os seres humanos como para o meio ambiente, conforme mostra a Tab.1.1. Desta maneira, foi estabelecido um valor máximo de contaminação por material; o qual deverá ser obedecido para que o equipamento ou produto tenha livre aceitação e circulação em países que coloquem juntamente com o desenvolvimento econômico, a preocupação sócio-ambiental.

TABELA 1.1 – Relação de substâncias contaminantes, seus limites e implicações no corpo humano e ao meio ambiente ^(1,2).

Substâncias	Limite	Humanos	Meio Ambiente
Bromobifelinas	1.000 mg/kg	Cancerígenos e neurotóxicos	Solúvel, bioacumulativo e resistente à decomposição
Cádmio	100 mg/kg	Cancerígeno, ataca os rins e causa desmineralização óssea	Bioacumulativo, tóxico e resistente à decomposição
Cromo polivalente	1.000 mg/kg	Genotóxico e alérgico	Facilmente absorvido pelas células e tem efeito alérgico e tóxico
Mercurio	1.000 mg/kg	Causa danos ao cérebro e tem características acumulativas	É acumulado por organismos vivos
Chumbo	1.000 mg/kg	Atinge o sistema nervoso e o sistema cardiovascular	Têm efeito acumulativo e efeitos altamente tóxicos em animais plantas e microrganismos

Existem diferentes diretivas relativas ao controle das substâncias apresentadas na Tab. 1.1. A Diretiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) proibiu desde 1º de julho de 2006 a introdução, em cada um dos 25 países-membro da União Européia, de produtos com os componentes acima citados. Juntamente com a RoHS, entrou em vigor em 1º de Janeiro de 2006 uma outra diretiva chamada WEEE (*Waste of Electrical and Electronic Equipment*) que tem o objetivo de aumentar o nível de reciclagem dos equipamentos eletro-eletrônicos e encorajar o desenvolvimento de produtos recicláveis desde a sua criação, onde pelo princípio da diretiva, o produtor ou importador se torna responsável pelo ciclo de vida do seu produto. Estas iniciativas são acompanhadas de outras, como: *European Recycling Platform* (ERP) e *Recycling Electrical Producer Industry Consortium* (REPIC) ⁽¹⁾.

Além disso, certificações de qualidade (ISO14000) e tratados internacionais (Tratado de Kyoto) buscam a redução de agentes contaminantes e o desenvolvimento sustentável. Mercados internacionais que aderiram formalmente ou “moralmente” ao Tratado de Kyoto buscarão entre 2008 a 2012, a redução na emissão e geração de poluentes.

Neste cenário, a utilização de contatos elétricos que possuam o óxido de cádmio substituído pelo óxido de estanho ou outro elemento atóxico, ganha cada vez mais volume de produção nacional e passam a ser absorvidos com aceitação no mercado internacional. Embora, de forma geral, o consumo de contatos elétricos contendo óxido de cádmio ainda tenha um alto volume de produção, principalmente para alimentar o mercado nacional que vagarosamente tenta se enquadrar às novas regulamentações internacionais.

Obviamente, muitos fabricantes continuam injetando produtos com estes contaminantes em países europeus, já que muitas vezes, o controle é realizado por amostragem e a quantidade de produtos que entra é muito grande.

Porém, países como Inglaterra, Bélgica, Holanda e Alemanha estipularam multa de aproximadamente 50 mil euros para cada evento ilegal descoberto, além desta legislação estabelecer um período de 04 anos de responsabilidade do fabricante sobre o produto colocado dentro da União Européia (EU). Em outras palavras, a empresa que vendeu um produto em 2007 para a UE responderá legalmente pelo mesmo até 2011 ⁽²⁾.

O óxido de cádmio em pó, importado da Alemanha por muitas empresas nacionais para a fabricação de pastilhas de contatos elétricos sinterizadas, já está com a sua comercialização comprometida. Muitas empresas já não conseguem obtê-lo com a mesma facilidade de antes.

Além disso, o entendimento tecnológico de determinadas variáveis do processo de brasagem, item objeto deste trabalho, garantem a possibilidade de maior aceitação pelo item

alternativo e a substituição de um produto muito consumido, como os contatos elétricos em AgCdO (prata-óxido de cádmio).

Finalizando, estudos que avaliem o comportamento e o desempenho destes materiais alternativos complementam e reforçam a substituição de componentes contaminantes. Porém, para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada, como metal de adição, uma liga contendo cádmio, por tratar-se de uma adição mais barata, ainda muito utilizada para a brasagem de contatos elétricos no Brasil, além de ser facilmente adquirida. Já o AgCdO do material de contato foi substituído pelo AgSnO₂, seguindo a tendência mundial.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
JUSTIFICATIVA.....	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Contatos elétricos.....	3
2.2 Tipos de contatos elétricos.....	4
2.2.1 Contatos elétricos de prata pura ou ligas à base de prata.....	5
2.2.2 Contatos elétricos de prata com componentes semi-refratários.....	7
2.2.2.1 Semi-refratários substitutos ao óxido de cádmio.....	9
2.2.3 Contatos elétricos de prata com componentes refratários.....	12
2.3 Fabricação de Contatos Elétricos.....	14
2.3.1 Fabricação de bases para contatos elétricos.....	15
2.3.2 Fabricação de lâminas/pastilhas de contato.....	17
2.3.3 Preparação final da lâmina de contato.....	20
2.4 Processos de junção para contatos elétricos.....	21
2.4.1 Brasagem.....	21
2.4.1.1 Métodos de brasagem.....	23

a. Brasagem oxiacetilênica.....	24
b. Brasagem por resistência.....	25
c. Brasagem em forno contínuo.....	26
2.4.1.2 Preparação de superfícies.....	27
2.4.1.3 Molhamento.....	29
a. Tensões superficiais e ângulo de contato.....	29
2.4.1.4 Espalhamento.....	34
2.4.1.5 Capilaridade.....	35
2.4.1.6 Métodos para obtenção da tensão superficial líquido-vapor (γ_{LV}).....	36
a. Método da ascensão capilar.....	37
b. Método da máxima pressão da bolha.....	39
c. Métodos baseados no perfil da gota.....	41
1. Ensaio da gota pendente.....	41
2. Ensaio da gota séssil.....	42
d. Método de destacamento.....	44
1. Ensaio da balança Wilhelmy.....	44
2.4.1.7 Folga de junta.....	46
2.5 Brasagem de contatos elétricos.....	48
2.5.1 Metais de adição.....	48
2.5.1.1 Metais de adição à base de prata (B _{Ag}).....	49
2.5.1.2 Diagrama de fase de uma liga quaternária Ag-Zn-Cd-Cu.....	51
2.5.2 Fluxos.....	53
2.5.3 Limpeza pós-brasagem.....	54
2.6 Defeitos na brasagem de contatos elétricos.....	55
2.7 Testes para controle de qualidade.....	56

2.7.1 Métodos não-destrutivos de inspeção.....	56
2.7.2 Métodos destrutivos de inspeção.....	57
2.8 Brasabilidade.....	58
2.8.1 Ensaios para avaliação da brasabilidade.....	59
a. Ensaio da gota séssil.....	59
b. Ensaio da ascensão capilar.....	59
c. Ensaio da cunha.....	60
d. Ensaio de cisalhamento.....	61
3 OBJETIVO.....	64
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
4.1 Confeção dos metais de base para os ensaios propostos.....	65
4.1.1 Metais de base para ensaio da gota séssil.....	65
4.1.1.1 Cobre eletrolítico.....	65
4.1.1.2 Latão.....	66
4.1.1.3 Prata pura.....	66
4.1.1.4 Prata-óxido de estanho.....	66
4.1.2 Metais de base para ensaio da cunha.....	67
4.1.2.1 Cobre / prata pura.....	67
4.1.2.2 Cobre / prata-óxido de estanho.....	67
4.1.2.3 Latão / prata pura.....	68
4.1.2.4 Latão / prata-óxido de estanho.....	68
4.2 Preparação superficial dos metais de base.....	68
4.3 Confeção dos metais de adição para os ensaios propostos.....	69
4.3.1 Metal de adição matriz.....	70
4.3.1.1 Metal de adição para os ensaios da gota séssil.....	70

4.3.1.2 Metal de adição para os ensaios da cunha.....	70
4.4 Preparação superficial dos metais de adição.....	71
4.5 Pesagem dos elementos.....	71
4.5.1 Ensaio da gota séssil.....	71
4.5.2 Ensaio da cunha.....	71
4.6 Aplicação de fluxo nos corpos de prova.....	72
4.7 Montagem dos corpos de prova.....	72
4.7.1 Ensaio da gota séssil.....	72
4.7.2 Ensaio da cunha.....	73
4.8 Suporte para ensaio.....	74
4.9 Máquina de brasagem por resistência elétrica.....	75
4.9.1 Parâmetros para controle.....	77
4.10 Variáveis.....	78
4.10.1 Ciclo de aquecimento e temperatura de brasagem.....	78
4.10.2 Curvas de <i>temperatura x tempo</i>	79
4.10.3 Repetições.....	81
4.11 Análises.....	82
4.11.1 Das amostras do ensaio da gota séssil.....	82
4.11.1.1 Avaliação do espalhamento.....	82
4.11.1.2 Medição do ângulo de contato.....	83
4.11.2 Das amostras do ensaio da cunha.....	85
4.11.2.1 Ensaio metalográficos.....	85
4.11.2.2 Ataque químico.....	85
4.11.2.3 Microscopia eletrônica de varredura.....	85
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	86

5.1 Dos ensaios da gota séssil.....	86
5.1.1 Ciclos térmicos.....	86
5.1.2 Variações de massa.....	89
5.1.3 Dimensionais.....	91
5.1.4 Aspecto visual dos ensaios da gota séssil.....	97
5.1.5 Microscopia eletrônica de varredura e micro-análises químicas por dispersão de energia.....	100
5.1.5.1 Identificação de fases.....	100
5.2 Dos ensaios da cunha.....	105
5.2.1 Ciclos térmicos.....	105
5.2.2 Variações de massa.....	109
5.2.3 Identificação de fases.....	110
5.2.4 Folga ideal.....	115
6 CONCLUSÕES.....	118
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	120
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
ANEXO 1.....	126
ANEXO 2.....	128

1 INTRODUÇÃO

Muitos equipamentos e dispositivos desenvolvidos para o manejo e distribuição da energia elétrica possuem contatos elétricos em sua construção. A distinção entre os contatos elétricos utilizados nestes dispositivos está em sua capacidade de condução e no tipo de aplicação para a qual ele fora projetado. Estes pontos influenciam diretamente em seu porte e na composição química da liga em que são fabricados.

O tipo de liga é fator determinante nas propriedades elétricas e mecânicas de um contato elétrico, já que variações de pequenas ordens na composição química de um contato são suficientes para ocasionar alterações; benéficas ou não; de condutividade elétrica e térmica, de extinção do arco voltaico, de dureza, de massa e de custo envolvido.

Um contato elétrico é composto da união de um material metálico que será responsável pela propriedade de condução elétrica e térmica, mais um material cerâmico que lhe dará estabilidade em altas temperaturas e resistência à erosão pelo arco voltaico. Além de materiais cerâmicos, muitos contatos elétricos recebem a adição de outros elementos metálicos à sua liga.

O processo de fabricação é outro ponto muito importante a ser observado já que diferentes propriedades também são obtidas alterando as rotas de fabricação. Contatos elétricos fabricados através da fundição de seus elementos de liga apresentam uma menor dureza superficial enquanto aqueles fabricados através da metalurgia do pó (M/P) apresentam dureza superior, embora sejam mais susceptíveis à queda de dureza quando do aumento da temperatura durante a brasagem.

Assim, na necessidade de aquisição ou produção de um contato elétrico, faz-se necessário conhecer as características de trabalho exigidas, além de: composição química,

processo de fabricação e demais propriedades; a fim de obter-se um produto final com as características desejadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contatos elétricos

Contatos elétricos são componentes condutores que quando aproximados através de uma ação mecânica externa, ao se tocarem, permitem a passagem da corrente em um circuito elétrico, como também permitem a sua interrupção através da separação de suas superfícies de contato.

Os contatos elétricos são utilizados em sistemas elétricos de alta à baixa tensão, como: disjuntores a óleo e a ar, chaves contactoras, chaves comutadoras, reguladores de tensão, relés, etc. E, dependendo de sua movimentação, recebem nomenclaturas distintas.

É chamado de contato fixo ou estacionário aquele que aguarda parado a aproximação da superfície do outro contato elétrico. Por outro lado é chamado de contato móvel aquele que recebe a ação mecânica externa, fazendo-o se aproximar da superfície de contato, do contato fixo.

Estes contatos elétricos podem ser formados por metais, ligas metálicas e/ou outros tipos de materiais. Nos casos de ligas metal-metal com propriedades próximas, estas podem ser produzidas através do processo de fundição. Porém, contatos elétricos compostos com materiais cerâmicos em sua estrutura apresentam dificuldades na fabricação por fundição e, geralmente, são fabricados pelo processo de sinterização. O produto resultante fica caracterizado pelo fato dos componentes estruturais manterem suas propriedades individuais depois de processados, tais como: alta condutividade elétrica, resistência ao desgaste, resistência à erosão gerada pela formação do arco voltaico e resistência ao transporte de massa (anodo/catodo) ^(3, 4).

Infelizmente não existe uma combinação perfeita de elementos que possibilite a construção de um contato elétrico ideal e genérico para quaisquer aplicações. Logo, o conhecimento das ligas existentes para contatos elétricos e uma avaliação das condições operacionais (corrente empregada, atmosfera de trabalho, número de ciclos, etc.), as quais o contato elétrico estará sujeito são fatores determinantes para uma pré-seleção de possíveis ligas a serem utilizadas que permitam uma satisfatória vida útil ^(3, 5).

2.2 Tipos de contatos elétricos

A prata provavelmente é o metal precioso mais largamente utilizado na confecção de contatos elétricos. Fato este, devido às suas propriedades como elevadas condutividade elétrica e térmica ^(6, 7).

Durante muitos anos o cobre também foi bastante utilizado, porém o aumento de sua resistência elétrica devido a rápida formação de óxidos em sua superfície fez da prata uma opção vantajosa, mesmo tendo seu custo muito superior ao cobre, porém inferior a outros metais nobres com propriedades próximas como, por exemplo, o ouro.

Então, ligas de prata à base de cobre foram bastante difundidas desde que utilizadas em ambientes com atmosferas não sulfurosas, evitando assim sérias oxidações na superfície de contato.

Podem-se dividir os contatos elétricos em três classes ⁽⁷⁾:

- a. Contatos elétricos de prata pura (99,9% Ag) ou ligas à base de prata pura;
- b. Contatos elétricos de prata com componentes semi-refratários;
- c. Contatos elétricos de prata com componentes refratários.

2.2.1 Contatos elétricos de prata pura ou ligas à base de prata

Contatos elétricos, tendo a prata como elemento predominante em sua composição, são utilizados em equipamentos de baixa tensão devido às características já citadas como:

- Alta condutividade elétrica e térmica: que limita o aquecimento interno do contato gerado pela passagem da corrente elétrica e dissipa o calor gerado com a formação do arco voltaico durante o fechamento ou a separação das superfícies energizadas (na abertura de circuitos);
- Resistência à oxidação atmosférica: gerando um filme de óxido instável sobre a superfície do contato, o qual é decomposto a aproximadamente 300° C ^(6, 7). Porém, quando expostos ao ozônio e atmosferas sulfurosas causam maiores danos e também filmes mais resistentes ⁽⁵⁾.

Exigências para um melhor desempenho destes contatos elétricos demandam a necessidade de adição de alguns outros metais à prata pura para que o aumento de dureza ou a redução de custo sejam atingidos.

O contato elétrico produzido em prata pura (99,9% Ag) possui ótima ductilidade e pode ter as mais diversas geometrias, sendo fabricado nas formas de rebites, lâminas ou fios.

A Tab. 2.1 mostra as diversas ligas utilizadas para contatos elétricos e as características que podem ser obtidas com adições de cobre, cádmio, paládio, platina e ouro à prata pura.

TABELA 2.1 - Ligas de prata frequentemente utilizadas para contatos elétricos ⁽⁷⁾.

Material	Composição Química [%]	Condutividade Elétrica		Dureza Rockwell T
		[% IACS*]		
Prata Pura	99,9 Ag	104	75	
Rebite Prata 1	92,5Ag-7,5Cu	88	81	
Rebite Prata 2	90Ag-10Cu	85	83	
Liga 1	72Ag-28Cu	84	85	
Liga 2	75Ag-24,5Cu-0,5Ni	75	85	
Liga 3	77Ag-22,6Cd-0,4Ni	31	85	
Liga 4	86,8Ag-5,5Cd-0,2Ni-7,5Cu	43	85	
Liga 5	85Ag-15Cd	35	83	
Liga 6	99,55Ag-0,25Mg-0,20Ni	70	77	
Liga 7	97Ag-3Pt	45	77	
Liga 8	90Ag-10Pd	27	80	
Liga 9	97Ag-3Pd	58	77	
Liga 10	99Ag-1Pd	79	76	
Liga 11	90Ag-10Au	40	76	

* International Annealed Copper Standard.

A adição de cobre à prata aumenta a dureza do contato elétrico, porém aumenta também sua resistividade e sua tendência à oxidação superficial. Caso esta oxidação não seja prevista ou controlada, o aumento da resistência elétrica provocará um superaquecimento do contato elétrico com chances de recozimento e posterior “colagem” entre as superfícies de contato, podendo causar sérios prejuízos ao equipamento. Por “colagem” entende-se como sendo a junção entre as duas superfícies do contato elétrico, através da fusão dos metais, devido ao aumento da temperatura pela passagem de corrente e/ou abertura de arco voltaico.

Testes mostraram que a prata pura exposta à atmosfera ambiente numa temperatura de 85° C demora 21 dias para ter a sua resistência elétrica aumentada em 5 vezes, enquanto o cobre a obtêm em apenas 01 dia, sob as mesmas condições ⁽⁶⁾.

Por esse motivo, contatos elétricos contendo cobre em sua liga necessitam trabalhar com uma força de fechamento maior (de 20 a 50 gramas) que em contatos de prata pura para que a camada de óxido formada seja rompida ⁽⁵⁾.

A adição de cádmio à prata provê a melhoria na capacidade de extinção do arco voltaico, redução à transferência de material anodo-catodo, resistência ao desgaste e à “colagem” entre as superfícies de contato.

A adição de paládio e platina à prata aumenta a dureza do contato elétrico na mesma intensidade que o cobre, porém com menor tendência à oxidação superficial. Além disto, proporcionam uma redução de transferência de material e do aumento da temperatura de fusão da liga.

O ouro adicionado à prata aumenta a dureza e a resistência à oxidação superficial, porém ocasiona uma redução na condutividade elétrica.

Os contatos elétricos apresentados acima são empregados em circuitos de corrente contínua e alternada. Além disso, os contatos elétricos ligados oferecem certa vantagem econômica sobre os contatos elétricos de prata pura, desde que utilizados em situações de trabalho compatíveis com suas limitações.

2.2.2 Contatos elétricos de prata com componentes semi-refratários

Esta classe de contatos elétricos é confeccionada através da metalurgia do pó (M/P) devido à incompatibilidade de temperaturas de fusão ou da limitação de solubilidade entre os componentes da liga, como os metais refratários e os óxidos metálicos.

Consistem na adição à prata de: óxido de cádmio, níquel, grafite, óxido de magnésio, óxido de estanho e outros elementos, conforme Tab.2.2 abaixo. Combinam características de excelente resistência à “colagem” e ao desgaste, porém com redução na condutividade elétrica se comparada à prata pura. São regularmente utilizados para médias e altas aplicações de corrente.

TABELA 2.2 - Propriedades de contatos elétricos semi-refratários ⁽⁷⁾.

Composição Química %	Condutividade Elétrica % IACS*	Dureza Rockwell F
97,5Ag-2,5CdO	88	70
95Ag-5CdO	84	76
90Ag-10CdO	75	84
86,7Ag-13,3CdO	68	84
85Ag-15CdO	65	85
95Ag-5Ni	95	84
90Ag-10Ni	87	89
85Ag-15Ni	80	93
70Ag-30Ni	55	87
60Ag-40Ni	44	92
40Ag-60Ni	25	97
99,75Ag-0,25C	103	73
99,5Ag-0,5C	102	72
99,25Ag-0,75C	100	70
99Ag-1C	99	69
98,5Ag-1,5C	97	66
98Ag-2C	77	-
95Ag-5C	55	25
90Ag-10C	35	3
88Ag-2C-10Ni	70	64
99,34Ag-0,41MgO-0,25NiO	70	97
90Ag-10Fe	90	81
50Fe-25Cu-25Ag	21	94

* International Annealed Cooper Standard.

A prata, com temperatura de fusão (T_F) igual a 960,8°C ^(6, 7), ligada ao cádmio que possui $T_F = 321,07^\circ\text{C}$ ou ao magnésio que possui $T_F = 650^\circ\text{C}$ ⁽⁸⁾, são ligas que não necessitam ser produzidas por M/P. A liga final pode ser fundida, solidificada e posteriormente passar por um processo de oxidação interna em forno com atmosfera oxidante controlada para formar os óxidos de cádmio ou magnésio, na liga já solidificada. A prata-óxido de cádmio (AgCdO) e a prata-níquel (AgNi) estão entre os contatos elétricos mais difundidos e utilizados para médias e altas tensões ⁽⁹⁾.

A adição de níquel à prata pode chegar a 40% em peso e necessita obrigatoriamente ser processada por M/P. Em porcentagens acima de 15% o níquel age como

forte elemento endurecedor, atingindo a maior dureza desta liga na porcentagem 60Ag-40Ni, onde juntamente com a liga 85Ag-15Ni são as comercialmente mais utilizadas ^(3, 4, 6, 7).

Contatos em prata-níquel são muito utilizados em contatos deslizantes onde se exige muito da dureza para resistência ao desgaste, a qual é superior em relação aos contatos de prata pura. Porém, um par de contatos elétricos em prata-níquel possuem maior tendência de “colagem”. Por esse motivo, normalmente se utiliza um par de contatos elétricos dissimilares: prata-níquel / prata-grafite ^(3, 7).

A adição de grafite à prata também é realizada por M/P e visa obter características como boa lubrificação e resistência à “colagem”, quando em pequenas proporções. É normalmente utilizado em contatos deslizantes onde se deseja baixo atrito entre as superfícies de contato. A variação de grafite na liga pode atingir de 0,25 a 90%, onde em altas porcentagens são utilizadas em circuitos de corrente contínua e alternada. São denominadas escovas elétricas e trabalham junto a anéis coletores de corrente.

2.2.2.1 Semi-refratários substitutos ao óxido de cádmio

Até os dias atuais pode-se colocar os contatos elétricos fabricados com óxido de cádmio entre os mais utilizados no grupo de contatos elétricos de prata com componentes semi-refratários para média e alta tensão, mesmo com a conhecida toxicidade do cádmio (Cd) que causa danos irreparáveis à saúde, especialmente aos rins ^(3, 7, 9-11).

O consumo de óxido de cádmio deverá sofrer considerável redução através de programas internacionais como a Diretiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) que proibiu a partir de 1º de julho de 2006 a introdução, em cada um dos 25 países-membro da União Européia, de produtos contendo quantidade considerada excessiva de elementos tóxicos, estando o cádmio entre eles ⁽¹²⁾.

No Brasil a realidade da geração e impacto de elementos contaminantes ainda não é conhecida ⁽¹¹⁾ e continua-se a utilizar em grande escala contatos elétricos possuindo de 5 a 15% em peso de óxido de cádmio (CdO) em sua composição.

Pesquisas buscam óxidos substitutos ao óxido de cádmio. Dentre os principais estão: o óxido de estanho (SnO_2), o óxido de zinco (ZnO) e o óxido de ferro (Fe_2O_3) ⁽⁹⁾. Porém, se para determinado projeto de equipamento elétrico utilizar-se na fabricação diferentes óxidos metálicos, o desempenho dos contatos elétricos serão distintos. É o que mostra a Fig.2.1, onde o tipo de carga ligada ao sistema elétrico (resistiva, indutiva ou capacitiva) e a substituição de óxidos metálicos na fabricação do contato elétrico, influenciam fortemente no desempenho do mesmo.

FIGURA 2.1 – Desempenho de um contato elétrico em prata-óxido de zinco (92Ag-8ZnO) comparado com outros óxidos metálicos, sob carga resistiva, capacitiva e indutiva ⁽⁹⁾.

Nota-se que, com a aplicação de uma carga resistiva o desempenho de contatos elétricos fabricados com 90Ag-10CdO, 92Ag-8SnO₂ e 93,6Ag-6,4Fe₂O₃, são inferiores ao desempenho apresentado por um contato elétrico 92Ag-8ZnO. Já com a aplicação de uma carga capacitiva tais contatos se aproximam muito do desempenho apresentado pelo 92Ag-8ZnO, com exceção do contato 93,6Ag-6,4Fe₂O₃, que continua apresentando o pior desempenho.

A adição destes óxidos à prata visa prover resistência à “colagem” e integridade do contato elétrico frente às altas temperaturas geradas pela passagem de corrente e pelo arco voltaico, mantendo assim estabilidade térmica e química, aliada a um custo satisfatório ⁽¹³⁾. Considerando-se a popularidade e desempenho dos contatos elétricos fabricados com óxido de cádmio (AgCdO), a seleção de um substituto que supere suas características elétricas torna-se um desafio tecno-científico.

Contatos elétricos de prata-óxido de estanho (AgSnO₂) têm se mostrado um substituto promissor, apresentando resistência à “colagem” e à perda de massa superiores ao óxido de cádmio devido à maior estabilidade térmica do óxido de estanho^(9, 10, 13, 14). Enquanto o óxido de cádmio começa a volatilizar a 1.100°C com perda de 17,6% em peso, o óxido de estanho não possui nenhuma perda até aproximadamente 1.400°C ⁽¹⁴⁾. Entretanto, existe a necessidade da adição de outros óxidos à prata-óxido de estanho (AgSnO₂) chamados de aditivos ou agentes dopantes. Estão entre os dopantes mais comumente usados: óxido de índio (In₂O₃), óxido de cobre (Cu₂O), óxido de rutênio (RuO₂), óxido de bismuto (Bi₂O₃), óxido de molibdênio (MoO₃) e óxido de tungstênio (WO₃) ^(9, 10, 13-18). Além de outros como: óxido de zinco (ZnO), óxido de tântalo (Ta₂O₅), óxido de mercúrio (HgO), óxido de antimônio (Sb₂O₃), óxido de telúrio (TeO₂) e carbeto de tântalo (TaC) ^(19, 20). Estes agentes dopantes possibilitam uma melhora nas propriedades elétricas para este tipo de contato elétrico no que diz respeito à

redução da resistividade, evitando a formação de uma fina camada de óxido de estanho na superfície de contato, e promovendo benefícios no processo de sinterização e na molhabilidade da superfície do óxido de estanho pela prata fundida ^(9, 13-18).

Processados por M/P, contatos elétricos em prata-óxido de estanho apresentam boas propriedades elétricas desde que atinjam a densidade final superior a 98% da densidade teórica, além da necessidade da utilização de finas partículas de prata e óxido de estanho; da ordem de 7 μ m para o pó de prata e 1 μ m para o pó de óxido de estanho ⁽¹⁰⁾.

2.2.3 Contatos elétricos de prata com componentes refratários.

Baseados na junção de elementos com alta temperatura de fusão como: tungstênio, carbeto de tungstênio ou molibdênio à prata; e manufaturados através da M/P ou por infiltração; esta classe de contatos elétricos garante características de boa condutividade elétrica e térmica (proporcionado pela prata) e resistência à erosão ocasionada pelo arco voltaico, além do ganho de dureza, de resistência ao desgaste e à “colagem”, proporcionado pelos componentes refratários.

São contatos elétricos aplicados frente a altas solicitações; com correntes elétricas acima de 1.000 A; e para fechamentos rápidos de circuitos, onde podem ser administradas correntes acima de 50.000 A ⁽¹⁰⁾.

A quantidade de prata na composição do contato elétrico pode ser variada. Para obter-se um aumento na condutividade elétrica aumenta-se também a quantidade de prata na composição, e para que se obtenha um aumento na dureza do contato elétrico reduz-se a quantidade da mesma. A Tab.2.3 apresenta as diferentes combinações dos contatos elétricos comercialmente utilizados.

TABELA 2.3 - Ligas comerciais para contatos elétricos em tungstênio-prata ^(3, 15).

Material ¹	Densidade [g/cm ³]	Dureza Brinell	Condutividade Elétrica [% IACS*]	Resistividade Elétrica ²
90W-10Ag	17,5	230-250	35-40	1000
85W-15Ag	17	210-230	42-44	700
80W-20Ag	16,3	200-220	45-49	500
75W-25Ag	15,8	160-180	49-53	350
70W-30Ag	15,2	140-160	53-57	250
65W-35Ag	14,7	120-140	57-61	200
60W-40Ag	14,4	110-120	61-65	180
50W-50Ag	13,5	90-100	68-72	150
30W-70Ag	12	50-60	82-89	120

¹ Composição em Peso (%); ² Tendo como base a resistividade da prata igual a 100.

* *International Annealed Copper Standard*.

Tanto o tungstênio como o carbeto de tungstênio e o molibdênio proporcionam as características apresentadas na Tab. 2.3. Consequentemente, a escolha das proporções em peso de cada componente a ser utilizado depende da análise criteriosa sobre as condições de trabalho do contato elétrico.

Contatos elétricos com grande quantidade de tungstênio possuem a tendência de formar uma estável, resistente e isolante camada de óxido em sua superfície, o que pode trazer severos problemas ao equipamento elétrico. Por esse motivo necessitam trabalhar com forças de fechamento maiores que um Newton e também recebem adição de cobalto (8 a 12%) para melhorar seu comportamento frente à oxidação ⁽¹⁰⁾. O trabalho com pares de contato dissimilares também é recomendado, utilizando-se assim um dos contatos em prata-grafite.

O molibdênio possui menor densidade que o tungstênio, respectivamente: 10,22 g/cm³ para o molibdênio e 19,2 g/cm³ para o tungstênio. Logo, a utilização do molibdênio é fundamental para aplicações onde massa e aceleração são pontos importantes, além de ser

mecanicamente trabalhado com mais facilidade que o tungstênio ^(8, 10). Por outro lado, a vantagem do carbeto de tungstênio sobre o tungstênio recai sobre sua menor taxa de oxidação.

O tungstênio também é ligado ao cobre através do processo de infiltração para produção de contatos elétricos. Estes possuem excelente resistência à corrosão pelo arco voltaico e boa condutividade elétrica, além do fato de serem comercialmente menos custosos que contatos elétricos em tungstênio-prata.

Através da M/P, os contatos elétricos podem receber uma pequena porcentagem de níquel em sua composição (0,5 a 1% em peso) aumentando sua dureza e aumentando também a resistividade elétrica ⁽¹⁵⁾. A seguir é apresentada a Tab.2.4 com as ligas comerciais para contatos elétricos em tungstênio-cobre.

TABELA 2.4 - Ligas comerciais para contatos elétricos em tungstênio-cobre ⁽¹⁰⁾.

Material ¹	Densidade [g/cm ³]	Dureza Brinell	Condutividade Elétrica [% IACS*]
80W-20Cu	15,5	220	33
70W-30Cu	14,2	200	36
60W-40Cu	13	170	43

¹ Composição em Peso (%).

* *International Annealed Cooper Standard.*

2.3 Fabricação de contatos elétricos

Um contato elétrico pode ser subdividido em duas partes: a base para contato elétrico e a pastilha de contato elétrico. Em algumas aplicações um contato elétrico pode ser confeccionado sem a brasagem de uma pastilha de contato, ou seja, é um contato elétrico usinado inteiramente em um liga de cobre, por exemplo.

A ausência da pastilha de contato brasada não o descaracteriza como contato elétrico, pois sua função continuará sendo de fechamento/abertura auxiliar de circuitos elétricos.

A este tipo de produto chama-se de contato elétrico de sacrifício. Sua função é pré-energizar o sistema gerando o primeiro ponto de contato durante o fechamento e o último ponto de contato durante a abertura do circuito. Tudo isso, para que o arco voltaico originado tanto na aproximação das superfícies quanto em sua separação não danifique o contato elétrico principal, o qual será auxiliado pelo contato de sacrifício que arcará com os danos mais fortes originados pelo arco voltaico. A seguir serão apresentados os processos de fabricação de bases para contato elétrico e a pastilha de contato elétrico.

2.3.1 Fabricação de bases para contatos elétricos

Chama-se de base de contato a peça que receberá sobre si a brasagem da pastilha de contato, compondo assim um contato elétrico: a base de contato e a pastilha de contato brasada (considerando a exceção do contato elétrico de sacrifício citado a priori), conforme Fig.2.2 abaixo:

FIGURA 2.2 – (a) Pastilhas de contato elétrico, (b) Bases para contato elétrico.

Em sua maioria, as bases para contatos elétricos são fabricadas em cobre eletrolítico, principalmente devido às suas características elétricas (100% IACS) e sua boa usinabilidade. Contudo, quando se faz necessário uma base de contato com características mecânicas diferentes da fornecida pelo cobre eletrolítico (como maior dureza, já que a dureza do cobre eletrolítico é muito afetada pelo aquecimento gerado durante a brasagem da pastilha de contato) utilizam-se bases em: latão, bronze e aço. Obviamente, ganha-se em propriedades mecânicas, porém perde-se na condutividade elétrica devido ao aumento da resistividade destes metais, conforme mostra a Tab.2.5:

TABELA 2.5 – Resistividade dos principais metais utilizados em contatos elétricos⁽²¹⁾.

Material	Resistividade
	[$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
Prata	0,00158
Cobre puro	0,0162
Ouro	0,024
Alumínio	0,0292
Tungstênio	0,055
Latão	0,067
Bronze	0,067
Níquel	0,087
Ferro puro	0,096

As bases de contato podem ser usinadas em máquinas operatrizes convencionais como: plainas limadoras, fresas, furadeiras, tornos, prensas ou maquinário mais moderno como: fresas CNC's ou centros de usinagem (para necessidade de produção em larga escala), até que atinjam o dimensional desejado. Podem também ser fabricadas pelos processos de forjamento ou fundição.

2.3.2 Fabricação de lâminas/pastilhas de contato

Os fabricantes de contatos elétricos disponibilizam seus produtos em formas de: tarugos, lâminas ou fios, além de rebites nas mais variadas dimensões, de acordo com a necessidade e a especificação. As diferentes geometrias podem ser observadas nas figuras Fig.2.3 e 2.4, a seguir.

FIGURA 2.3 – (a) Tarugos e pastilhas de tungstênio-cobre, (b) Pastilhas de tungstênio-prata, (c) Lâminas de prata-óxido de cádmio, (d) Pastilhas de prata-óxido de cádmio.

FIGURA 2.4 – (a) Rebites 80Ag – 20Ni + base de cobre, (b) Rebites 80Ag – 20Ni + base de cobre, aplicado banho eletrolítico de prata.

Estes contatos elétricos podem ser produzidos por dois processos: metalurgia do pó (M/P) ou fundição seguida por oxidação interna ^(9, 10, 14).

Através da M/P segue-se o caminho clássico: mistura-se o pó de prata juntamente com o pó do respectivo óxido metálico até sua homogeneização; compacta-se a mistura em prensa hidrostática ou hidráulica e, finalmente, sinteriza-se a peça e obtêm-se o produto semi-acabado ou produto final.

Exemplificando, para a fabricação de lâminas em prata-óxido de cádmio, prata - óxido de estanho ou prata-óxido de zinco, sinteriza-se um “*blank*” na composição desejada e o mesmo após a sinterização, será extrudado em uma prensa hidráulica de grande capacidade (acima de 200 toneladas). Posteriormente, o produto resultante da extrusão, será laminado em laminador de rolos até que se atinja o dimensional de espessura desejado para lâmina.

Ainda com a M/P é possível seguir outra rota. Mistura-se o pó de prata ao pó metálico, faz-se a homogeneização, compacta-se a peça e após a sinterização, realiza-se a oxidação interna em forno com atmosfera oxidante controlada. Estas rotas estão esquematizadas na Fig.2.5 ^(9, 10).

FIGURA 2.5 - (I) Rota para a confecção de contatos elétricos através do processamento de pó de prata + pó do óxido metálico; (II) Rota para a confecção de contatos elétricos através do processamento de pó de prata + pó metálico ⁽¹⁰⁾.

Trabalhando com metais que possuam temperaturas de fusão próximas e solubilidade entre si, é possível obter a liga através da fundição dos metais conforme Fig.2.6. Assim, fundem-se os metais, realiza-se o vazamento numa coquilha com a forma geométrica desejada. Após o resfriamento, o tarugo solidificado passará pelas conformações mecânicas (extrusão e/ou laminação) e, se necessário, poderá ser oxidado internamente em forno com atmosfera oxidante controlada.

FIGURA 2.6 - (III) Rota para a confecção de contatos elétricos através do processo de fundição da prata granulada + metal granulado ⁽¹⁰⁾.

Este processo é muito empregado na fabricação de fios de prata pura ou composta, que são utilizados na confecção de rebites. Este fio de prata será chapeado contra um fio de

cobre em maquinário adequado para este tipo de operação, resultando em rebites com base de cobre e área de contato na liga de prata desejada, conforme mostrado na Fig.2.4.

No caso de contatos elétricos que possuem tungstênio em sua composição, a fabricação do contato é realizada em duas etapas.

Primeiramente, através da M/P, fabrica-se um esqueleto de tungstênio com porosidade controlada. Na sequência, este esqueleto é levado para um forno a vácuo ou sob atmosfera controlada e sobre ele é descansada uma massa de cobre ou prata, a qual se infiltrará no esqueleto poroso de tungstênio pela ação das forças de capilaridade. A esse processo dá-se o nome de infiltração.

2.3.3 Preparação final da lâmina de contato

Conforme apresentado nas figuras: Fig.2.5 e 2.6, seguindo as rotas I, II ou III, pode-se confeccionar fios ou lâminas na liga de prata desejada, ou seja, uma lâmina de prata com a dispersão de óxido metálico em sua estrutura (por exemplo: 88%Ag-12% CdO ou 90%Ag-10% SnO_2) ou uma lâmina de prata pura (99,9% Ag).

Considerando-se uma lâmina de contato composta, após passar pelo processo de laminação ainda não estará 100% pronta para ser trabalhada e, posteriormente, brasada sobre uma base para contato elétrico. Obrigatoriamente, conforme mostra a Fig.2.7, faz-se necessária a aplicação de uma fina camada de prata pura (99,9% Ag) em um dos lados da lâmina para que seja possível o molhamento/espalhamento do metal de adição pré-aplicado ou adicionado durante a brasagem, uma vez que, este diretamente aplicado sobre a prata ligada terá a molhabilidade deficiente e o espalhamento prejudicado.

FIGURA 2.7 - Ilustração representando as três camadas em uma pastilha/lâmina de contato elétrico.

A presença de óxidos metálicos, ponto melhor abordado no tópico 2.4.1.3, é o elemento gerador da necessidade de uma interface que equilibre as energias interfaciais entre o metal de adição e a liga de prata semi-refratária.

2.4 Processos de junção para contatos elétricos

A junção entre a base para contato elétrico e a pastilha de contato é realizada por brasagem através dos processos que serão abordados abaixo.

2.4.1 Brasagem

Convenção estabelecida pela *American Welding Society* (AWS) denomina brasagem como sendo 'o processo de junção de materiais realizado através da fusão de um metal de adição com temperatura *liquidus* superior a 450°C e inferior à temperatura *solidus* do metal de base⁽²²⁻²⁵⁾, ou seja, a junção ocorre acima dos 450°C sem a fusão do metal de base'.

Ocorre assim a distribuição do metal de adição entre as superfícies a serem unidas através de fenômenos como: molhamento, espalhamento e capilaridade.

É importante evitar o equívoco do termo brasagem acima apresentado, com os termos: soldagem ou soldagem branda.

Na soldagem branda, aplicada principalmente na área eletrônica, também ocorre a fusão de um metal de adição sem a fusão do metal de base, como na brasagem. Porém, a temperatura *liquidus* deste metal de adição é inferior a 450°C e também inferior à temperatura *solidus* do metal de base. Ou seja, a união ocorre abaixo dos 450°C sem a fusão do metal de base.

Já na soldagem, aplicada nas mais diversas áreas, para a fabricação da junção ocorre ou apenas a fusão do metal de base, ou a fusão do metal de base e também a do metal de adição.

Na soldagem por resistência a ponto, produzida pelas conhecidas máquinas “ponteadeiras”, funde-se o metal de base sem nenhuma adição externa. A soldagem por arco elétrico é um exemplo de fusão tanto do metal de base quanto do metal de adição (eletrodo), formando uma poça de fusão com ambos os metais, o qual originará o cordão de solda.

Pode-se visualizar abaixo na Fig.2.8, a distribuição dos diversos processos de brasagem e soldagem, incluindo as possíveis necessidades de proteção da junta.

FIGURA 2.8 - Diagrama dos processos de brasagem ⁽²²⁾.

2.4.1.1 Métodos de brasagem para contatos elétricos^(22- 26).

Os processos de brasagem para contatos elétricos serão apresentados abaixo. A seleção de cada um destes processos devem ser avaliados pontos como: produtividade, habilidade do operador e propriedades dos itens a serem brasados.

a. Brasagem oxiacetilênica.

Também conhecida como brasagem por chama, baseia-se na utilização de maçaricos; conforme mostra a Fig.2.9; e a fonte de calor se dá pela queima de misturas de acetileno + oxigênio, porém outros gases como: propano, GLP e gás natural, também podem ser usados.

Trata-se de um processo manual, portátil, de média produtividade e que exige muito da habilidade do operador. Este processo pode ser parcialmente ou totalmente automatizado para ganhos em: produção e qualidade. Existe a necessidade de utilização de fluxos em pasta ou pó, para a proteção das superfícies que receberão o metal de adição, devido à facilidade de oxidação superficial. O metal de adição pode ser adicionado na forma de varetas, anéis, fitas ou pó misturado ao fluxo.

FIGURA 2.9 - Maçarico + acessórios, para a realização de brasagem oxiacetilênica ou por chama.

b. Brasagem por resistência.

A fonte de calor se dá pela passagem de corrente através da peça e de eletrodos que exercem uma pressão sobre o conjunto a ser brasado. O aquecimento destes eletrodos é que irão fornecer calor, por condução, ao conjunto a ser unido. Por este motivo, estes eletrodos são fabricados com materiais que apresentam alta resistência à passagem da corrente elétrica como: carbono, grafite, eletrografite, tungstênio, molibdênio ou aço.

Caso não exista uma atmosfera controlada adaptada ao equipamento, se fará necessária a utilização de fluxo. Porém, existe a necessidade de se ater à sua condutividade, já que quando seco o fluxo torna-se isolante, impedindo o fechamento do circuito elétrico e a passagem da corrente pelos eletrodos e o conjunto a ser brasado.

O maquinário que realiza este tipo de brasagem é bastante parecido com o maquinário que realiza soldagem a ponto por resistência (ponteadeiras), conforme a Fig.2.10. Em muitas vezes, estas ponteadeiras são eletricamente adaptadas para a realização de brasagem por resistência.

O metal de adição utilizado pode ter a forma de varetas, anéis, fitas ou pó misturado ao fluxo, e a pressão exercida sobre o conjunto apenas deverá ser retirada quando o metal de adição já estiver solidificado.

É um processo também de média produtividade e com restrições quanto à geometria do conjunto devido à necessidade de aplicação de força e a distribuição homogênea de calor durante o aquecimento.

O equipamento pode ser manual, tendo os parâmetros de tempo e temperatura controlados pela habilidade de um operador, ou automatizados através de sensores presentes no equipamento.

FIGURA 2.10 - Maquinário de 45 kVA utilizado para realização de brasagem por resistência.

c. Brasagem em forno contínuo.

Notoriamente mais produtivo que os processos acima apresentados, a brasagem em forno contínuo é empregada para produção em larga escala ou, quando se faz necessária, a brasagem em atmosfera controlada. A Fig.2.11 apresenta seu esquema.

Neste método, o conjunto a ser brasado é levado já posicionado, ao interior do forno através de esteiras e, na maioria das vezes, o aquecimento se dá por resistências elétricas. Podem existir câmaras de pré-aquecimento até que se chegue à câmara principal, onde se atingirá a temperatura programada para que o metal de adição funda e flua pela junta a ser preenchida.

Os parâmetros controlados são: velocidade da esteira, temperaturas e atmosfera protetora.

Depois de concluída a brasagem, o conjunto pode passar por uma câmara de resfriamento e terminar seu ciclo dentro do forno.

Os pontos que devem ser observados para a aplicação deste método são:

- O conjunto a ser brasado deve permitir um pré-posicionamento para que este possa ser levado ao interior do forno sem ter sua posição alterada.
- O metal de adição pode vir pré-aplicado sobre a superfície a ser brasada ou permitir que este seja alocado entre as superfícies a serem unidas, sem interferência no posicionamento do conjunto.
- O aquecimento do conjunto deve ser uniforme para evitar pontos superaquecidos e posteriores distorções.

Além de atmosferas controladas (hidrogênio, argônio, hélio ou vácuo), para brasagens especiais é possível utilizar uma combinação também com fluxo, formando uma fina e seca camada sobre as superfícies de contato.

FIGURA 2.11 - Esquema de forno contínuo com resfriamento a jatos de água ⁽²²⁾.

2.4.1.2 Preparação de superfícies

Finas camadas de óxidos resultantes da reação do metal de base com o oxigênio da atmosfera ou com contaminantes superficiais como: óleo, graxa ou sujeira, podem

modificar o comportamento do molhamento e da fluidez dos metais de adição durante a brasagem. Por este motivo necessitam ser removidos quimicamente ou mecanicamente ⁽²²⁾.

Agentes químicos como: tricloretileno, fosfato de trisódio e outros, são muito eficazes na eliminação de graxa ou óleo, além de operações mecânicas que também colaboram para a eliminação destas impurezas como: escovação, lixamento ou jateamento.

Pode-se optar também por acabamentos superficiais como: deposição eletrolítica para a manutenção e proteção de superfícies a serem unidas. Principalmente, se o metal de adição não possuir boa molhabilidade sobre o metal de base/substrato, método este muito usado em materiais cerâmicos ⁽²²⁾.

A rugosidade superficial de áreas a receberem o metal de adição também deve ser controlada. Da mesma forma que impurezas e camadas de óxidos sobre as superfícies dificultam o molhamento e espalhamento do metal de adição, uma rugosidade excessiva, ou muito pequena, dificulta a ação das forças de capilaridade. Superfícies com riscos de usinagem muito grosseiros agem como barreiras para o espalhamento do metal de adição, enquanto superfícies muito polidas também prejudicam o preenchimento da junta.

Por outro lado, a existência de rugosidade não excessiva da ordem de 0,8 a 2 μ m RMS permite um espalhamento direcionado do metal de adição e boa ação das forças de capilaridade. Mas este valor não deve ser considerado como ideal para todos os pares a serem unidos já que cada conjunto apresenta um comportamento distinto, o qual necessita ser pesquisado e determinado ⁽²²⁾. Normalmente a rugosidade gerada por lixamento é benéfica à ação das forças de capilaridade.

2.4.1.3 Molhamento

O fenômeno do molhamento tem sido ponto de pesquisa e desenvolvimento durante os últimos dois séculos, tendo como destaque os trabalhos desenvolvidos por Dupré, Laplace e Young. Trabalhos estes que nasceram da observação do comportamento de sistemas quimicamente inertes à temperatura ambiente ⁽²⁷⁾.

Porém, observações realizadas muito antes de Thomas Young, considerado o pioneiro das observações sobre as tensões superficiais e a formação do ângulo de contato durante o molhamento, mostram que os primeiros registros foram feitos por Arquimedes, através da observação de madeiras que flutuavam sobre as águas, embora com o conceito sobre molhamento ainda pouco desenvolvido ^(28, 29).

Desde então, novas pesquisas vem sendo desenvolvidas utilizando sempre a linguagem e as equações clássicas dos cientistas do século dezanove (Dupré, Laplace, Young) para buscar um melhor entendimento para os processos que envolvam o molhamento de uma superfície sólida por um líquido ou um metal fundido.

Este aprofundamento é de suma importância para que os efeitos analisados em uma simples gota líquida sejam refletidos sobre o comportamento de um fluxo adicionado ou a um metal de adição fundido sobre um substrato sólido.

a. Tensões superficiais e ângulo de contato

Os átomos presentes num sólido, gás ou num líquido, apresentam comportamentos físicos distintos devido às forças de atração/repulsão existente entre eles. O mesmo ocorre com os átomos presentes no interior de uma gota ou em sua superfície. Essa interação atômica está diretamente ligada ao seu número de coordenação, ou seja, ao número

de partículas que circundam um único átomo. Conforme mostra a Fig.2.12, átomos do interior de um líquido possuem maior número de coordenação e interagem com um número maior de vizinhos que os átomos da superfície. Essa maior interação anula a resultante das forças interatômicas.

FIGURA 2.12 - Forças de atração entre moléculas da superfície e do interior de um líquido, para uma interface plana líquido-vapor ⁽³⁰⁾.

Já os átomos da superfície apenas interagem com os vizinhos do interior do líquido, apresentando assim um estado de maior energia e ocasionando a contração da superfície ^(31, 32).

Uma gota líquida em equilíbrio descansando sobre um substrato sólido define três interfaces denominadas como: interface sólido-vapor, interface sólido-líquido e interface líquido-vapor, conforme mostra esquematicamente a Fig.2.13 abaixo:

FIGURA 2.13 - Equilíbrio estático de uma gota líquida apresentando a linha de contato entre o líquido e a superfície. Além da formação das interfaces: sólido-líquido, líquido-vapor e sólido-vapor ⁽³⁰⁾.

O ângulo formado pelas interfaces líquido-vapor e sólido-líquido determina o ângulo de contato “ θ ”, sendo que seu valor é utilizado para definir a molhabilidade do líquido sobre um substrato sólido. Assim, se a interação entre um líquido e um substrato resultar num $\theta > 90^\circ$, estabelece-se que o líquido não “molha” o substrato, enquanto que se $\theta < 90^\circ$, estabelece-se que o líquido “molha” o substrato. Se $\theta = 0$, considera-se a presença de um molhamento ideal, onde o líquido se espalha completamente sobre o substrato sólido.

A Fig.2.14 apresenta situações de molhamento espontâneo e forçado, com as respectivas representações de seus ângulos de contato.

FIGURA 2.14 - Exemplo de (a) molhamento espontâneo e (b) molhamento forçado⁽²⁷⁾.

O ângulo de contato obedece à clássica equação de Young que será deduzida do ponto de vista termodinâmico a partir da equação da Energia Livre de Helmholtz (F). Onde “ E ” é a energia interna do sistema, “ S ” é a entropia do sistema e “ T ” é a temperatura, sendo que a temperatura e o volume são constantes⁽³²⁾:

$$F = E - T * S \quad (1)$$

A Eq.1 na forma diferencial é dada por:

$$dF = dE - T * dS - S * dT \quad (2)$$

Como o sistema é isotérmico, isto é, com temperatura “T” constate:

$$S * dT = 0 \quad (3)$$

E expressando a derivada da energia interna do sistema “dE” como:

$$dE = TdS - p_1dV_1 - p_2dV_2 - \rho gdh + \sum_i \mu_i dn_i + \sum_i \gamma_i dA_i + k_1 dc_1 + k_2 dc_2 \quad (4)$$

A energia livre de Helmholtz transforma-se em:

$$dF = -p_1dV_1 - p_2dV_2 - \rho gdh + \sum_i \mu_i dn_i + \sum_i \gamma_i dA_i + k_1 dc_1 + k_2 dc_2 \quad (5)$$

Adotando as hipóteses de que: temperatura, pressão e volume são constantes ($\Delta T=0$; p_1 e $p_2=0$; ΔV_1 e $\Delta V_2=0$), a ação da gravidade é desprezível, o número de mols na interface ($\Delta n_i=0$) é constante e que a curvatura da calota da gota sobre o substrato é perfeitamente esférica (c_1 e $c_2=0$), reduz-se a energia livre de Helmholtz à:

$$dF = \sum_i \gamma_i dA_i \quad (6)$$

Assim, a Eq.6 poderá ser escrita como:

$$dF = \gamma_{SV}dA_{SV} + \gamma_{SL}dA_{SL} + \gamma_{LV}dA_{LV} \quad (7)$$

Considerando-se o aumento de área A_{SL} igual ao oposto da perda de área A_{SV} , ou seja:

$$dA_{SL} = -dA_{SV} \quad (8)$$

E considerando-se a projeção de dA_{LV} sobre o substrato igual à:

$$dA_{LV} = dA_{SL} * \cos\theta \quad (9)$$

Tem-se:

$$dF = (-\gamma_{SV} + \gamma_{SL} + \gamma_{LV} * \cos\theta) * dA_{SL} \quad (10)$$

Por fim, calculando-se na condição de equilíbrio ($\frac{\delta F}{\delta A_{SL}} = 0$), chega-se a:

$$\frac{\delta F}{\delta A_{SL}} = 0 = -\gamma_{SV} + \gamma_{SL} + \gamma_{LV} * \cos\theta \quad (11)$$

Desta maneira chega-se à equação de Young abaixo:

$$\cos\theta_Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (12)$$

É importante salientar, que as limitações que a equação de Young apresenta são devidas às hipóteses simplificadoras consideradas, principalmente por não considerar a variação de composição química e de tensão superficial através da gota, além da dificuldade em se atingir o equilíbrio termodinâmico pela rapidez das reações envolvidas no fenômeno de molhamento.

Analisando-se a equação de Young, percebe-se que se pode favorecer ou prejudicar o molhamento de um substrato através de fatores que influenciam as tensões superficiais. Portanto, há o favorecimento do molhamento com o aumento de γ_{SV} e com as diminuições de γ_{SL} e γ_{LV} .

Fatores que aumentam γ_{SV} estão diretamente ligados à limpeza da superfície. Assim, a eliminação de impurezas e óxidos adsorvidos na superfície do sólido, como também, um controle da atmosfera (atmosfera redutoras) melhoram o molhamento sobre a superfície.

2.4.1.4 Espalhamento

Ao comportamento dinâmico resultante do molhamento entre uma gota e um substrato sólido, denomina-se espalhamento. Ou seja, trata-se da interação energética entre as energias de superfície até que seja estabelecida uma situação de equilíbrio, conforme Fig.2.15.

FIGURA 2.15 - Esquema dos perfis assumidos por um cilindro sólido que se funde para formar a gota sésil, com ângulo de contato inicial de 120° , que se espalha sobre o substrato, exibindo os ângulos de contato transientes até atingir o ângulo de contato final de equilíbrio, $\theta_F = 30^\circ$ ^(27, 33).

A velocidade com que este espalhamento ocorre dependerá da taxa com que a matéria interna à gota se move em direção à linha de contato ⁽³³⁾ e das interações energéticas já citadas. Ela pode ser calculada segundo a Eq.13 abaixo ⁽³¹⁾:

$$v_e = k \cdot \frac{e \cdot f(\gamma)}{\mu \cdot x} \quad (13)$$

Onde:

- v_e : velocidade de espalhamento do metal de adição;
- e : abertura ou folga da junta;
- $f(\gamma)$: função dependente das energias de interface envolvidas;
- μ : viscosidade;
- x : comprimento da junta ou de brasagem.

2.4.1.5 Capilaridade

Por definição, um tubo com diâmetro inferior ao de um fio de cabelo é chamado de capilar. Quando um tubo de vidro com um pequeno diâmetro e com ambas as extremidades abertas é verticalmente imerso em água, observa-se que a água sobe pelo tubo e permanece a uma altura superior ao nível da água da região externa ao capilar.

O líquido sobe pelo capilar devido às alterações nas tensões superficiais entre as duas fases imiscíveis, em função das forças de adesão com a parede do vidro e de coesão do próprio fluido ⁽³⁰⁾. Ou seja, as forças de adesão com a parede do capilar são maiores que as forças de coesão do líquido, e esse desequilíbrio de forças gera a movimentação do fluido ⁽²²⁾. Assim, a esta interação entre o capilar e a água defini-se como sendo o fenômeno da capilaridade.

Além da necessidade de um equilíbrio energético favorável entre um substrato e um líquido para que ocorra o molhamento e o espalhamento, existe a necessidade da participação das forças de capilaridade para que um pequeno espaçamento ou folga seja preenchido ⁽²³⁾.

As forças de capilaridade estão diretamente ligadas às tensões superficiais resultantes da interação entre o líquido e o substrato, e também às características físicas como o tamanho deste espaçamento ou folga.

À medida que este espaçamento aumenta, a ação das forças de capilaridade diminui e menor é a capacidade de penetração do fluido. Porém, isto pode ser compensado pela viscosidade do fluido, ou seja, um fluido mais viscoso pode preencher maiores espaçamentos ⁽²³⁾.

E é este fenômeno que rege o processo de brasagem.

2.4.1.6 Métodos para obtenção da tensão superficial líquido-vapor (γ_{LV})

É de grande importância a existência de métodos que permitam o desenvolvimento de pesquisas a fim de determinar a interação entre um líquido (ou metal fundido) e um substrato (ou metal de base).

Existem ensaios capazes de determinar a tensão líquido/vapor (γ_{LV}) através da utilização de alguns métodos:

- a. Método da ascensão capilar
- b. Método da máxima pressão da bolha

- c. Métodos baseados no perfil da gota
 - 1. Ensaio da gota pendente
 - 2. Ensaio da gota sésil
- d. Método de destacamento
 - 1. Balança de Wilhelmy

Algumas características destes métodos serão apresentadas a seguir.

- a. Método da ascensão capilar

No método de ascensão capilar realiza-se a imersão de um tubo circular, de raio relativamente pequeno, em um recipiente contendo um líquido a ser estudado ⁽³⁴⁾. Se o líquido molhar completamente a parede do capilar ($\theta < 90^\circ$), a superfície do líquido se curvará para cima (concavidade) gerando o chamado de “menisco positivo”. Caso o líquido não molhe a superfície sólida, o menisco terá sua curvatura para cima (convexidade) e será chamado de “menisco negativo”, como mostra a Fig.2.16.

FIGURA 2.16 – Representação da elevação do fluido por um tubo de raio r até uma altura máxima h , gerando um menisco positivo devido à ação das forças de capilaridade ⁽³⁴⁾

A equação da capilaridade foi definida em 1805 por Young⁽³⁴⁾.

Tomando como base a observação de uma bolha de sabão, notou-se que na ausência da gravidade ou outros campos, seu formato é esférico representando a menor área de superfície por unidade de volume. Considerando seu raio igual a r e a área de uma esfera igual a $4\pi r^2$, a energia livre de superfície será dada por $4\pi r^2\gamma$. Se houver um decréscimo de dr no raio da bolha, a energia livre de superfície será igual a $8\pi r\gamma$. Como uma pequena contração da bolha gera uma diminuição da energia livre de superfície, o gradiente de pressão ΔP fora da bolha será contrabalanceado por uma pressão interna igual a ΔP $4\pi r^2\gamma$.

Como o sistema se encontra em equilíbrio mecânico, tem-se:

$$\Delta P \ 4\pi r^2\gamma = 8\pi r\gamma \quad (14)$$

Logo, a diferença de pressão será igual à:

$$\Delta P = 2\gamma / r \quad (15)$$

A Eq.15 é conhecida como Equação de Laplace, sendo mais comumente apresentada na forma abaixo:

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (16)$$

Analisando o líquido dentro de um pequeno capilar de raio r , a uma altura h do nível da superfície líquida plana, tem-se que a diferença de pressão ΔP é igual à pressão hidrostática na coluna do líquido dentro do capilar, portanto:

$$\Delta P = \Delta \rho g h = \frac{2\gamma_{LV}}{r} \quad (17)$$

Sendo possível assim encontrar a tensão superficial líquido-vapor, em função da altura do menisco, conhecendo-se ρ , g e r ^(30-32, 34, 35).

Como exemplo, para um capilar com diâmetro de 2,7cm imerso em água, a altura h da coluna de água será igual a 0,0009mm, enquanto para um capilar com diâmetro de 1,6cm a altura h será de 0,04mm ⁽³⁴⁾.

O método da ascensão capilar é considerado o mais acurado para a medição da tensão superficial líquido-vapor pois sua base teórica foi desenvolvida com exatidão e as variáveis de processo podem ser bem controladas ⁽³⁴⁾. Porém, faz-se necessário que o líquido realmente “molhe” o capilar por ser um processo dependente do ângulo de contato formado, e por este motivo, o capilar normalmente utilizado é construído em vidro ⁽³⁴⁾.

b. Método da máxima pressão da bolha

Este método consiste em soprar vagarosamente bolhas de gás inerte através de um tubo imerso no líquido a ser estudado ^(30-32, 34, 35), conforme apresentado na Fig.2.17.

FIGURA 2.17 - Representação esquemática do método de máxima pressão da bolha ⁽³⁴⁾.

Tendo o tubo um pequeno diâmetro interno, durante o crescimento da bolha, esta terá uma forma semi-esférica e seu raio se aproximará do raio interno ($\underline{r}$), desde que o líquido “molhe” a parede do tubo.

Caso isso não ocorra, a bolha de gás inerte se desprenderá do bico do tubo antes de atingir a pressão máxima.

Segundo a equação de Young, quando o raio é mínimo tem-se a máxima diferença de pressão ΔP , a qual será igual à pressão gerada pela altura da coluna de água.

Dependendo da profundidade ($\underline{t}$) que o bico do tubo de vidro permanecer abaixo da superfície líquida, a pressão é calculada da seguinte forma:

$$\Delta P = P_{MAX} - P_t \quad (18)$$

Onde, P_{MAX} é a pressão máxima e P_t é a pressão correspondente à coluna de água.

Porém, existem algumas limitações para este método. A primeira encontrada é durante a preparação deste ensaio, pois a seleção do tubo deve permanecer dentro de uma relação r/a próxima a 0,05; onde $\underline{r}$ é igual ao raio do tubo e $\underline{a}$ é a constante capilar ou comprimento capilar aproximada por $\sqrt{r.h}$ ⁽³⁴⁾.

Assim, o método da pressão máxima da bolha também é um bom ensaio para a obtenção da tensão superficial líquido-vapor por possibilitar uma rápida medição e não depender do ângulo de contato. Além de necessitar de uma pequena quantidade do líquido a ser estudado para realização do mesmo ^(34, 35).

c. Métodos baseados no perfil da gota

1. Ensaio da gota pendente

Neste ensaio formam-se gotas pendentes com a utilização de um capilar ou uma seringa gotejadora, uma mesa anti-vibração, uma câmara experimental e os equipamentos para captação das imagens.

A gota livremente suspensa adquire a forma de uma elipsóide e através dos equipamentos de captação de imagens observam-se os parâmetros para o cálculo da tensão superficial líquido-vapor, conforme Fig.2.18. Sempre na ausência de perturbações, tendo conhecimento da densidade do líquido e da temperatura do ensaio.

FIGURA 2.18 - (a) Imagem de gota pendente apresentando os parâmetros: diâmetro equatorial (d_e) e do diâmetro d_s , encontrado a partir da base da gota, a uma distância d_e ⁽³⁶⁾.

Os parâmetros a serem encontrados são: d_e igual ao diâmetro equatorial, d_s igual ao diâmetro de um plano qualquer a uma distância d_e da base da gota ^(33, 34). Definiu-se então um fator de forma chamado de S , que é igual a:

$$S = \frac{d_s}{d_e} \quad (19)$$

E também H , que é igual a:

$$H = -\beta \left(\frac{d_e}{b} \right)^2 \quad (20)$$

Tanto S como H dependem da forma da gota, logo:

$$\gamma_{LV} = \frac{g \cdot \sigma \cdot b^2}{\beta} = \frac{g \cdot \sigma \cdot d_e^2}{H} \quad (21)$$

2. Ensaio da gota sssil

O ensaio consiste basicamente em permitir que uma pequena massa de material ou uma gota lquida da ordem de 0,005 a 5ml seja colocada sobre um substrato slido horizontal at que o equilbrio seja estabelecido ⁽³⁶⁾. No caso de uma pequena massa de material, esta amostra sobre o substrato slido levada a um forno a vcuo para que durante sua fuso e equilbrio, a dinmica do espalhamento seja observada. Logo, este ensaio visa colher dados sobre o ngulo de contato, a tenso superficial lquido-vapor e desempenho de molhabilidade e espalhamento.

Existem outras variaes para este ensaio como mostra Fig.2.19, abaixo:

FIGURA 2.19 - Diversas tcnicas para a realizao do ensaio da gota sssil: (a) Tcnica clssica, (b) Apresentando a formao de uma liga durante o ensaio, (c) Liberao de uma gota suspensa, (d) Gota transferida, (e) Gota molhando dois substratos, (f) Ensaio existindo uma inclinao da base ⁽²⁷⁾.

Para que não existam distorções no ensaio da gota sésil alguns parâmetros devem ser bem controlados como: limpeza das superfícies, microestrutura, perpendicularidade do substrato, rugosidade superficial, temperatura e atmosfera de ensaio ⁽³⁰⁻³⁶⁾.

A tensão superficial líquido-vapor pode ser encontrada através de uma medição detalhada do tamanho e formato da gota ensaiada, conforme mostra Fig.2.20 abaixo:

FIGURA 2.20 - Perfil da gota sésil mostrando as cotas utilizadas para encontrar os valores da tensão superficial. Os principais raios de curvatura são: $R_1 = QK$ e $R_2 = QP$ ⁽²⁷⁾.

Observando a figura Fig.2.20 e aplicando a equação geral que descreve a superfície de uma gota líquida estática, tem-se que a pressão do fluido no ponto Q é dada por:

$$P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = g \cdot \Delta \rho \cdot z_{90} + c \quad (22)$$

Onde: Z_{90} é a distância vertical a partir da origem O , de acordo com a convenção de Bashforth e Adams ⁽³³⁾, $\Delta \rho$ é a diferença de densidades entre o fluido e c é a constante de

capilaridade. No topo da gota os raios de curvatura R_1 e R_2 são iguais e nomeados como $\underline{b}$, o diâmetro máximo da gota é dado por $\left(\frac{x}{\sin\varphi}\right) = b$ e a constante de capilaridade $\underline{c}$ é igual a:

$c = \frac{2\gamma}{b}$. Tem-se assim a equação da pressão do fluido no ponto Q escrita como:

$$\frac{b}{R_1} + \frac{\sin\varphi}{\frac{x}{b}} = \frac{z_{90}}{b} \left(\frac{g \cdot \rho \cdot b^2}{\gamma} \right) + 2 \quad (23)$$

Onde β é definido como:

$$\beta = \frac{g \cdot \rho \cdot b^2}{\gamma} \quad (24)$$

No início da década de 80, com o uso de microcomputadores para a aquisição de dados, pôde-se calcular o perfil de uma gota séssil através do melhor ajuste de seu perfil teórico com a resolução da equação diferencial de Bashforth e Adams, comparado-a assim com o perfil da gota obtida experimentalmente ^(33, 36).

d. Método de destacamento

1. Ensaio da balança Wilhelmy

Os princípios deste ensaio foram propostos em 1863 por Wilhelmy ⁽³⁰⁻³⁵⁾. Utilizando-se uma placa fina suspensa, o nível de líquido em uma célula é elevado até que o líquido toque a placa colocada na extremidade de uma balança. Na medida em que o líquido

exerce força sobre a chapa, esta é registrada em função do tempo ^(31, 34, 35). O esquema do equipamento é apresentado na Fig.2.21 abaixo:

FIGURA 2.21 - Desenho esquemático de uma balança de Wilhelmy ⁽²⁷⁾.

Neste método, a tensão superficial líquido-vapor é calculada a partir do equilíbrio de forças na placa, conforme se segue:

$$\Delta W = \sigma_{LV} \cdot \cos \theta \cdot p \quad (25)$$

As forças atuantes sobre o sólido são registradas no instante em que a placa toca o líquido até o momento em que é retirada do mesmo, podendo através dos dados armazenados levantar-se uma curva *força x tempo* denominada curva de molhamento ^(31, 34, 35).

2.4.1.7 Folga de junta

A folga de uma junta a ser brasada, ou seja, a distância entre as duas superfícies a serem unidas exerce grande influência sobre a resistência mecânica da união e também sobre a ação das forças de capilaridade. Por este motivo, é um ponto importante a ser definido para o sucesso de um processo de brasagem.

FIGURA 2.22 - Influência do espaçamento da junta sobre a tensão de cisalhamento ⁽²²⁾.

Conforme indica a figura 2.22, juntas com espaçamento entre superfícies da ordem de 0,05 a 0,13mm apresentam um melhor comportamento perante uma solicitação mecânica. Porém, a utilização de diferentes metais de adição/metais de base implica em espaçamentos específicos a serem determinados.

Para metais de adição à base de prata, folgas de junta da ordem de 0,13 a 0,20mm são utilizadas. Porém, para determinados conjuntos esta folga pode ultrapassar 0,25mm em função de características específicas entre o metal de adição e o substrato ^(22, 23).

Na Tab.2.6, pode-se observar alguns intervalos de folgas de junta para diferentes metais de adição/metais de base.

TABELA 2.6 - Folgas recomendadas para brasagem de alguns metais e suas ligas ^(adaptado ref.23).

Metal de Adição	Folga da Junta (mm)
BCu	0,00 a 0,05
BCuP	0,03 a 0,12
BAg	0,05 a 0,12 para brasagem com fluxo
	0,03 a 0,05 para brasagem com atmosfera
BAISi	0,15 a 0,25 para comprimento brasado sobreposto menor que 6,35 mm
	0,25 a 0,61 para comprimento brasado sobreposto maior que 6,35 mm

Além disso, as propriedades dos materiais a serem unidos devem ser consideradas já que a junção de materiais dissimilares com diferentes coeficientes de expansão térmica pode provocar tensões na junta, devendo assim ser considerado no dimensionamento da mesma ⁽²³⁾.

Durante a brasagem para que ocorra o espalhamento do metal de adição, faz-se necessário a expulsão do fluxo já presente na junta a ser preenchida. Assim, o filme de fluxo deverá ser substituído por um filme de metal de adição.

Para juntas com espaçamentos inferiores ao estipulado, as forças de capilaridade impedirão a expulsão do fluxo que permanecerá fortemente aderido às superfícies e impedirá a penetração do metal de adição fundido, interferindo diretamente nas características mecânicas devido à possíveis falhas de preenchimento ⁽²²⁻²⁵⁾.

Por isso, o dimensionamento de folgas para brasagem deve ser respeitado para que não surjam defeitos como: o deficiente espalhamento do metal de adição, a inclusão de fluxo

ou a formação de fases eutéticas contínuas ao longo da junta brasada, que venham a comprometer o desempenho da junta.

A inclusão de fluxo se dá pela existência de uma folga excessiva, onde o metal de adição fundido penetrará pela junta e se posicionará ao redor de poças de fluxos que não foram devidamente expulsas da junta brasada.

Alguns fatores influenciam diretamente na necessidade de aumento da folga da junta como: interações entre o metal de base e o metal de adição (difusão do metal de base no metal de adição ou o reverso), a formação de filmes intermetálicos entre o metal de base e o metal de adição, além de longos comprimentos de junta e metais de base facilmente oxidáveis.

2.5 Brasagem de contatos elétricos

2.5.1 Metais de adição

Os metais de adição devem possuir características como ⁽²²⁾:

- Habilidade em formar juntas brasadas com características físicas e mecânicas desejadas;
- Temperaturas de fusão compatíveis com a do metal de base, além de boa fluidez à temperatura de brasagem para um satisfatório preenchimento da junta através da ação das forças de capilaridade;
- Homogeneidade e estabilidade para evitar a separação de seus constituintes na temperatura de brasagem;
- Habilidade para molhar as superfícies;
- Caso seja necessário, habilidade em permitir ou evitar as interações com o metal de base;

- Não serem excessivamente voláteis.

A escolha de um metal de adição entre os diversos comercialmente disponíveis, deve basear-se no atendimento a algumas propriedades ligadas ao conjunto que irá recebê-lo.

São listados abaixo quais pontos devem ser questionados para a correta seleção de um metal de adição ⁽²³⁾:

- Possibilidade de interação com o metal de base;
- Possíveis esforços mecânicos que a junta estará sujeita;
- Características elétricas que a junta deve possuir;
- Características do ambiente de trabalho da junta como: temperatura local, umidade, atmosfera agressiva, etc.;
- Qual o método de brasagem utilizado para que se possa escolher o formato ideal do metal de adição (anéis, varetas, fitas, etc.). O qual também estará ligado às características geométricas do conjunto a ser unido;
- Sua temperatura de brasagem correlacionada com as características do metal de base.

Assim, conhecendo as características e limitações do metal de adição, conhecendo as propriedades finais do metal de base e da junta, é possível obter um conjunto brasado que irá possuir o desempenho exigido.

2.5.1.1 Metais de adição à base de prata (BAg)

Metais de adição à base de prata são padronizados pela AWS (*American Welding Society*) com a notação BAg, seguido de um algarismo que identifica a composição química da adição.

A Tab.2.7 apresenta alguns metais de adição padronizados à base de prata, além de outros exemplos à base de alumínio, magnésio, cobre, ouro e níquel. Os intervalos de brasagem também são apresentados.

TABELA 2.7 - Classificação AWS para metais de adição para brasagem ⁽²⁵⁾.

Classificação AWS	Intervalo de Brasagem [°C]	Composição Química [%]
Ligas Sílica – Alumínio		
BAISi-2	599 – 621	92,5Al-7,5Si
BAISi-3	571 – 601	86Al-10Si-4Cu
Ligas de Magnésio		
BMg-1	604 – 627	89Mg-2Zn-9Al
BMg-2 ^a	582 – 610	83Mg-5Zn-12Al
Ligas Cobre – Fósforo		
BCuP-1	788 – 927	95Cu-5P
BCuP-2	732 – 834	93Cu-7P
Ligas Cobre e Cobre – Zinco		
Bcu-1	1093 - 1149	99,9Cu (min)
Bcu-1a	1093 - 1149	99Cu (min)
Ligas de Prata		
BAg-1	618 – 760	45Ag-15Cu-16Zn-24Cd
BAg-1a	635 – 760	45Ag-15Cu-16Zn-24Cd
BAg-2	700 – 843	45Ag-26Cu-21Zn-18Cd
BAg-2A	710 – 843	30Ag-27Cu-23Zn-20Cd
BAg-3	688 – 816	52Ag-15Cu-15Zn-15Cd-3Ni
BAg-4	780 – 899	40Ag-30Cu-23Zn-2Ni
Ligas de Ouro		
BAÚ-1	1016 - 1093	37Au-63Cn
BAÚ-2	890 – 1010	79,5Au-20,5Cn
Ligas de Níquel		
Bni-1	1066 - 1204	14Cr-3Br-4Si-4Fe-75Ni
Bni-2	1010 - 1177	7Cr-3Br-4Si-3Fe-83Ni

A família BAg contida nesta classificação pode ser utilizada para a união da maioria dos metais ferrosos e não-ferrosos (com exceção das uniões em alumínio e magnésio), necessitando da aplicação de fluxo para a brasagem sem atmosfera protetora. O zinco e o cádmio são geralmente adicionados às ligas prata-cobre para diminuição da temperatura de brasagem, proporcionando também melhora em propriedades como: fluidez e molhamento. Com a adição de zinco e/ou cádmio, diminui-se a temperatura *liquidus* da liga ternária ou quaternária, reduzindo-se assim a temperatura de fusão ⁽²³⁾. Ainda, é possível adicionar ao metal de adição: lítio, fósforo ou boro, a fim de causar um efeito adicional auto-

fluxante durante a brasagem. Com o aumento da temperatura, um destes elementos reduz a camada de óxido sobre a superfície que irá receber o metal de adição gerando um componente óxido com temperatura de fusão inferior à temperatura de brasagem. Já fundido, este óxido é expulso da superfície a ser brasada deixando-a limpa e apta a receber o metal de adição ^(22, 24). Existe assim, a opção da utilização de fluxo ou de metal de adição auto-fluxante. Pode-se observar na Tab.2.8 algumas diferentes ligas de metais de adição à base de prata nas mais diversas composições.

TABELA 2.8 - Metais de adição comercialmente disponíveis, à base de prata ⁽²²⁾.

Composição Química (%)											Temperatura	Temperatura
Ag	Cu	Li	Zn	Pd	Ni	Sn	Mn	In	Cd	Outros	<i>Solidus</i> (°C)	<i>Liquidus</i> (°C)
98	...	2	...	...	...	...	...	...	...	...	699	760
90	...	...	...	10	...	...	...	...	...	...	1001	1066
85	...	...	...	...	...	...	15	...	...	...	960	970
80	...	...	...	20	...	...	...	...	...	...	1071	1177
77	21	...	...	...	2	...	...	...	...	...	780	830
75	...	...	...	20	...	...	5	...	...	...	999	1121
71,5	28	...	...	...	0,5	...	...	...	...	...	780	788
70	...	...	...	30	...	...	...	...	...	...	1160	1232
68	27	...	...	5	...	...	...	...	...	...	804	810
63	27	...	...	...	...	...	...	10	...	...	685	729
60	27	...	...	...	...	...	...	13	...	...	607	743
58	32	...	...	10	...	...	...	...	...	...	827	851
52	28	...	...	20	...	...	...	...	...	...	880	899
50	15	...	25	...	...	...	...	...	10	...	627	640
45	30	...	12	...	...	...	13	...	...	...	699	702
44	27	...	13	...	...	...	...	...	15	1	607	619
41	17	...	18	...	...	...	...	...	24	...	613	643
40	30	...	25	...	5	...	...	...	...	...	660	860
40	30,5	...	29,5	...	...	...	...	...	...	...	621	707
50	20	...	28	...	2	...	...	...	...	...	677	727

2.5.1.2 Diagrama de fase de uma liga quaternária Ag-Zn-Cd-Cu

O diagrama quaternário 40Ag-Cu-Zn-Cd está apresentado na Fig. 2.23 , indicando a composição química bastante aproximada do metal de adição de interesse para o presente trabalho, que é a adição 40%Ag-21%Zn-20%Cd-19%Cu.

FIGURA 2.23 – Corte do diagrama de fases quartenário para o sistema 40Ag-Cu-Zn-Cd ⁽³⁸⁾.

As eventuais fases presentes para a composição química em questão são ⁽³⁸⁻⁴⁰⁾: α solução sólida rica em Cu; α_1 solução sólida rica em Ag; β (β_x e β_y) são fases Ag-Cd ou Ag(Cd, Zn) ou Ag-Zn ou Zn(Ag,Cu). As composições químicas estão apresentadas na Tab.2.9.

TABELA 2.9 – Composição química das fases prováveis para a liga 40%Ag-20%Cu-20%Zn-20%Cd ⁽³⁸⁾, na temperatura de 615°C.

Fase	α		α_1		β_x		β_y		γ		γ_1	
Composição	%	at%	%	at%	%	at%	%	at%	%	at%	%	at%
Ag	5	4	4	55,95	8	5,02	51	46,04	9	5,74	40	37,83
Cu	60	62,93	5	7,79	49	52,19	7	10,73	35	37,92	3	4,82
Zn	31	31,6	10	15,13	39	40,38	11	16,38	50	52,66	10	15,6
Cd	4	2,37	24	21,13	4	2,41	31	26,85	6	3,68	46	41,75

2.5.2 Fluxos

Disponíveis na forma de pó, pasta ou líquido, objetivam eliminar camadas de óxidos e gases adsorvidos sobre as superfícies a serem brasadas. Permite ao metal de adição exercer o molhamento e seu espalhamento sem a interferência de agentes que possam modificar as energias de superfície ⁽²²⁻²⁵⁾.

O fluxo pode também evitar a volatilização de constituintes presentes no metal de adição, com alta pressão de vapor ⁽²³⁾.

O fluxo deve proteger a superfície cobrindo-a totalmente, até que a temperatura de brasagem seja atingida. Após isso, o metal de adição fundido deverá expulsar o fluxo fundido dentre as superfícies, ocupando a junta. Por este motivo, propriedades como: viscosidade, tensão superficial do fluxo e energia interfacial entre o fluxo e o metal de base, são muito importantes ^(22, 23).

Assim, para desempenharem esta finalidade, os fluxos possuem entre seus constituintes: boratos, fluoboratos, fluoretos, ácido bórico calcinado e outros componentes, que irão proporcionar aos diversos tipos de fluxos fabricados, diferentes temperaturas de ativação e aplicações específicas para diferentes metais de base e metais de adição ⁽²²⁻²⁴⁾.

Apresenta-se na Tab.2.10 alguns fluxos classificados pela AWS, além da devida aplicação para cada conjunto a ser brasado.

TABELA 2.10 - Fluxos classificados pela AWS e suas características ⁽²²⁾.

Classificação AWS	Indicação do Fluxo			Temperatura de Ativação (°C)	Componentes
	Categoria de Brasagem	Metal de base	Metal de Adição		
FB3D, FB3I, FB3J	Alta Temperatura	Cobre, Ferro, Ligas de Níquel e Carbetos	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Ni} , B _{Au} , R _B C _u Zn	760 à 1205	Boretos, Fluoretos
FB3A	Para Prata	Cobre, Ferro, Ligas de Níquel e Carbetos	B _{Ag} , B _{Cu} P	565 à 870	Boretos, Fluoretos, Boro
FB3C	Para Prata	Cobre, Ferro, Ligas de Níquel e Carbetos	B _{Ag} , B _{Cu} P	565 à 925	Boretos, Fluoretos, Boro
B3F	Para Prata	Cobre, Ferro e Ligas de Níquel	B _{Ag} , B _{Cu} P	650 à 870	Boretos, Fluoretos

2.5.3 Limpeza pós-brasagem

Realizada a brasagem, faz-se necessária a remoção do fluxo residual para que seja evitada a oxidação e corrosão da junta, além de prover a própria limpeza do conjunto. Orienta-se realizar esta remoção em até 48 horas depois de concluída a brasagem ⁽²²⁾.

Esta limpeza pode ser realizada com água quente (já que muitos fluxos são à base de água) ou água fria, a qual ocasionará um choque térmico para que a camada de fluxo solidificada seja rompida. Este último citado deve ser avaliado para que não sejam geradas distorções no conjunto ou diminuição das propriedades mecânicas devido ao rápido resfriamento.

Além disso, operações mecânicas como: escovamento ou jateamento também podem ser utilizadas para a remoção do fluxo remanescente. A utilização de ultra-som para áreas inacessíveis também pode ser empregada.

Quando tais processos não se fazem efetivos, o ataque com soluções ácidas ao conjunto brasado é uma boa opção. Porém, deve ser também avaliada a natureza do material brasado e o tempo de imersão para que o conjunto não seja agredido ou afetado em demasia. Algumas soluções ácidas utilizadas são: ácido sulfúrico e ácido bórico.

2.6 Defeitos na brasagem de contatos elétricos

Devidamente determinados, fatores como: a escolha do método de brasagem e seus parâmetros, a seleção do metal de adição, a seleção do fluxo adequado e a limpeza das superfícies, assegurarão a qualidade da junta brasada ^(24, 25). Quando estes pontos não são observados, inevitavelmente defeitos terão mais chances de interferir no desempenho do conjunto unido.

Em suma, estes defeitos estão relacionados à falta de preenchimento da junta pelo metal de adição, pela inclusão de fluxo devido ao seu aprisionamento entre as superfícies ou devido ao não molhamento/espalhamento do metal de adição. Causas estas justificadas pela limpeza deficiente das superfícies (presença de graxa, óleo, sujeira), presença de filmes óxidos, deterioração ou saturação do fluxo, mau dimensionamento da junta e utilização de um metal de adição incompatível.

A fim de encontrar estes possíveis defeitos, nem sempre perceptivos a olho nu, apresenta-se uma seção relacionada à testes para controle de qualidade.

2.7 Testes para controle de qualidade ⁽²²⁾

O controle de qualidade de juntas brasadas pode ser realizado com a aplicação de métodos destrutivos ou não-destrutivos, através de corpos de prova ou realizados diretamente no conjunto acabado, a fim de garantir a qualidade uniforme e satisfatória da junção.

2.7.1 Métodos não-destrutivos de inspeção

Normalmente são métodos realizados em conjuntos brasados já acabados, onde se deseja verificar a qualidade da brasagem sem causar nenhum dano ao produto. Pode-se citar alguns diferentes métodos para a análise não-destrutiva de juntas brasadas:

- Inspeção visual: embora não possa determinar defeitos internos à junta brasada, a inspeção visual pode ser utilizada como um método preliminar para a realização de posteriores ensaios mais reveladores. É possível perceber descontinuidades na junta brasada, imperfeições superficiais, porosidade excessiva, falhas de preenchimento e erosão do metal de base. Geometrias que não permitem boa visualização dispensam este tipo de inspeção.
- Teste de prova: consiste na aplicação de uma sobrecarga sobre o conjunto brasado a fim de reproduzir uma situação superior àquela de trabalho que o conjunto estará sujeito durante seu ciclo natural de serviço. Esta sobrecarga, sem danos ao conjunto acabado, pode ser realizada pela aplicação de cargas hidrostáticas, cisalhamento, torção ou qualquer outro tipo de ação. Este tipo de teste deve vir seguido de algum outro ensaio subsequente que apresente

algum possível defeito na região da união (como trincas), gerado pelo esforço.

- Inspeção por raios-x: este tipo de ensaio é capaz de identificar se existem regiões que não foram preenchidas pelo metal de adição, mostrando-as mais escuras que as regiões preenchidas. Porém, não avalia a qualidade da ligação metalúrgica entre o metal de adição e o metal de base, apenas identifica a presença ou não, de metal de adição. Este tipo de inspeção exige uma uniformidade na espessura da junta e sua sensibilidade se limita a 2% da espessura da mesma.
- Inspeção por ultra-som: este método é baseado na emissão de vibração a baixa amplitude e alta frequência sobre o conjunto brasado, e por este motivo, sua aplicação depende muito da geometria do conjunto. É capaz de identificar tanto a presença de metal de adição quanto sua ligação metalúrgica com o metal de base, sendo assim considerada uma técnica muito apurada e bastante utilizada.

2.7.2 Métodos destrutivos de inspeção

Os métodos destrutivos de inspeção podem ser aplicados tanto em corpos de prova individuais como em conjuntos brasados já acabados.

Estão entre eles os ensaios metalográficos, mecânicos e químicos.

- Ensaios metalográficos: requerem a remoção de parte da junta brasada para que esta seja preparada e examinada microscopicamente. Assim, é possível visualizar problemas como: falhas no espalhamento do metal de adição, porosidade, erosão do metal de base, difusão do metal de adição; além na possibilidade de observação microestrutural final.
- Ensaios mecânicos: são ensaios baseados na aplicação de força externa sobre uma das partes do conjunto até o rompimento e separação da união. Visa determinar a qualidade das ligações metalúrgicas e as tensões suportadas, como também a presença de falhas de preenchimento ou a inclusão de fluxo na junta brasada. Esta força externa pode ser aplicada buscando causar cisalhamento, torção ou impacto.
- Ensaios químicos: basicamente utilizados para a determinação de composições químicas ou resistência à corrosão. O conjunto brasado pode ser acondicionado em ambiente agressivo para simulação dos efeitos gerados por atmosferas agressivas no campo de trabalho.

2.8 Brasabilidade

Defini-se brasabilidade como sendo a capacidade de brasar uma união, de forma a conseguir o desempenho previsto em projeto. Assim, a brasabilidade resulta do nível de interação entre as diferentes características do metal de adição, do metal de base, do fluxo, da atmosfera e das condições térmicas de aquecimento.

Para que seja possível quantificar esta interação, foram desenvolvidos ensaios que simulam as condições de projeto e de trabalho, a fim de permitirem um estudo prévio do comportamento da junta a ser preenchida.

2.8.1 Ensaios para avaliação da brasabilidade

Apresenta-se a seguir os ensaios utilizados para avaliarem a brasabilidade de um metal de base por um metal de adição.

a. Ensaio da gota séssil

Conforme apresentado no tópico 2.4.1.6-c.2, este ensaio visa colher dados sobre o ângulo de contato e o desempenho de molhabilidade/espalhamento do metal de adição sobre o metal de base. É possível também encontrar o valor da tensão superficial líquido-vapor através da leitura do perfil da gota formada.

Existe a necessidade da utilização de um forno com atmosfera protetora, que forneça energia suficiente à massa que descansa sobre o metal de base para que se atinja sua temperatura de fusão e se estabeleça o equilíbrio entre as interfaces.

b. Ensaio da ascensão capilar

Este ensaio pode ser dividido em dois tipos: por imersão e por junta em “V”. No ensaio de ascensão capilar por imersão uma placa do metal de base em estudo é inserida num líquido a fim de se observar a interação deste líquido com as paredes da placa. O ponto de observação é a formação de um menisco positivo ou negativo, conforme abordado no tópico 2.4.1.6-a.

No ensaio da ascensão capilar por junta em “V”, o metal de base é construído verticalmente em forma de junta e rodeado pelo metal de adição apenas em uma das

extremidades, conforme mostra a Fig.2.24. Na sequência, o conjunto é levado a um forno com atmosfera protetora.

Após a fusão do metal de adição, e em caso de molhamento, este tenderá a preencher a junta até uma altura máxima de equilíbrio, caracterizando assim o ensaio.

FIGURA 2.24 – Esquema ilustrativo da montagem e realização de um ensaio de ascensão capilar com junta em “V”.

c. Ensaio da cunha

Também é necessária a construção de uma junta com o metal de base a ser preenchida horizontalmente pelo metal de adição fundido, conforme Fig.2.25. O objetivo deste tipo de ensaio é verificar qual é a folga de junta ideal para que a brasagem obtenha o desempenho esperado, conforme abordado no tópico 2.4.1.7.

FIGURA 2.25 – Esquema ilustrativo da montagem de um ensaio da cunha.

A variação da folga neste tipo de ensaio torna possível a visualização das diferentes fases que se formam ao longo da mesma, em função da diferença de composições durante a solidificação do metal de adição.

Desta forma, é determinado em qual limite de espaçamento a brasagem deve ser realizada para que não ocorra a precipitação de uma fase que venha a comprometer o desempenho mecânico e elétrico da junta brasada.

Com o aumento da folga, a formação de uma fase eutética frágil ao longo da junta é a principal responsável pela diminuição das propriedades mecânicas.

d. Ensaio de cisalhamento

Estes ensaios mecânicos visam verificar as propriedades providas à junta brasada, em decorrência da aplicação de uma força externa. Trata-se de um ensaio destrutivo.

Definida a folga ideal e produzido um corpo de prova, este será tracionado em equipamento específico, sendo que a resistência à tração estará diretamente relacionada aos parâmetros à que a brasagem fora projetada e executada.

Neste tipo de ensaio é possível verificar a direta influência que a precipitação de uma fase eutética ou outro defeito de brasagem, pode causar no conjunto brasado. É o que mostra a Fig.2.26.

FIGURA 2.26 – (a) Junta brasada sem a precipitação de fase eutética; (b) Junta brasada com a precipitação contínua de fase eutética ⁽³⁷⁾.

Na Fig.2.26, nota-se que na região de folga ideal (região 2), onde não ocorre a precipitação de fase eutética, a tensão de cisalhamento é muito superior àquela onde a folga excessiva (região 3) gera uma não-homogeneidade na estrutura cristalina do metal de adição. Logo, tem-se uma redução na propriedade mecânica de tração, desde que esta fase possua um comportamento frágil se comparada às demais fases presentes no metal de adição solidificado.

Falhas de preenchimento geradas pela dificuldade da expulsão do fluxo fundido (região 1) ou por contaminação das interfaces, também refletem diretamente na redução na resistência da junta à tração.

Vale ressaltar que uma brasagem bem projetada e de satisfatória execução é aquela que quando submetida à tração até sua ruptura, rompe na coesão do metal de adição que preencheu a junta e não nas interfaces da junção.

3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a brasabilidade de um metal de adição sobre substratos não-ferrosos, utilizando uma máquina de brasagem por resistência para a geração de calor. O metal de adição em estudo é uma liga de prata BAg na seguinte composição: 40%Ag 21%Zn 20%Cd 19%Cu. Os substratos ou metais de base estudados são: cobre eletrolítico (CA-11000), latão (C-26800), prata pura (99,9%Ag) e prata-óxido de estanho (Ag-10%SnO₂).

A avaliação da brasabilidade foi realizada através dos seguintes ensaios:

- Ensaio da gota sésil: para avaliar o espalhamento do metal de adição, além da medição do ângulo de contato;
- Ensaio da cunha: para determinar a folga ideal de brasagem;
- Ensaios metalográficos: para analisar a microestrutura da junta brasada;
- Microscopia eletrônica de varredura: para determinar a composição química das fases formadas na junta brasada e medir as folgas ideais para os diferentes substratos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Confeção dos metais de base para os ensaios propostos

Segue-se abaixo as rotinas seguidas para a obtenção dos metais de base, tanto para os ensaios da gota sésil quanto para os ensaios da cunha.

4.1.1 Metais de base para ensaio da gota sésil

Para os ensaios da gota sésil foi utilizado como metal de base: cobre eletrolítico, latão, prata pura e prata-óxido de estanho.

4.1.1.1 Cobre eletrolítico

Bases de contato elétrico em cobre eletrolítico são muito utilizadas para o recebimento da brasagem das pastilhas de contato em função de sua ótima condutividade elétrica (100% IACS). Foi utilizada a liga CA-11000 na composição química, em peso, conforme Tab.4.1:

TABELA 4.1 – Composição química da liga CA-11000 utilizada.

Cu (%)
99,9990

Para os ensaios da gota sésil utilizou-se uma chapa quadrada de 15 mm com espessura igual a 1,0 mm.

4.1.1.2 Latão

Também utilizada comercialmente como metal de base para o recebimento da brasagem de pastilhas de contato elétrico, a liga CA-26800 foi utilizada para a confecção de corpos de prova. Esta liga possui a composição, em peso, conforme Tab.4.2:

TABELA 4.2 – Composição química da liga CA-26800 utilizada.

Cu (%)	Fe (%)	Pb (%)	Zn (%)
65,52	0,0088	0,0010	34,4359

Para os ensaios da gota sésil utilizou-se uma chapa quadrada de 15 mm com espessura igual a 1,0 mm.

4.1.1.3 Prata pura

A prata pura é um elemento presente nas pastilhas e lâminas de contato que trabalha como uma interface entre o metal de adição e o material de contato Ag-10%SnO₂.

Em pastilhas ou lâminas comerciais a espessura desta camada é da ordem de 10% da espessura total do item (espessura total = espessura do material de contato + espessura da camada de prata pura + espessura do metal de adição pré-aplicado). Para uma espessura total superior a 1,0 mm esta camada limita-se a 0,10 mm de espessura. Para os ensaios da gota sésil utilizou-se uma chapa quadrada de 15 mm com espessura igual a 1,0 mm.

4.1.1.4 Prata-óxido de estanho

Para os ensaios da gota sésil utilizou-se uma chapa quadrada de 15 mm com espessura igual a 1,0 mm na liga Ag-10%SnO₂.

4.1.2 Metais de base para ensaio da cunha

Para os ensaios da cunha foram confeccionados quatro tipos de corpos de prova que simulam a brasagem de uma pastilha de contato sobre uma base não-ferrosa.

Utilizou-se corpos de prova em: cobre / prata pura, cobre / prata-óxido de estanho, latão / prata pura e latão / prata-óxido de estanho.

4.1.2.1 Cobre / prata pura

Confeccionou-se lâminas de 15 mm de largura em dois comprimentos: 43 mm para a lâmina em cobre e 45 mm para a lâmina em prata pura. Estas foram aparafusadas em uma das extremidades mantendo na região de apoio um distanciamento máximo de 0,4 a 0,5 mm.

A espessura da lâmina de prata pura foi de 1,0 mm. A espessura da lâmina de cobre foi de 1,0 mm.

4.1.2.2 Cobre / prata-óxido de estanho

Confeccionou-se lâminas de 15 mm de largura em dois comprimentos: 43 mm para a lâmina em cobre e 45 mm para a lâmina em prata-óxido de estanho. Estas foram aparafusadas em uma das extremidades mantendo na região de apoio um distanciamento máximo de 0,4 a 0,5 mm. A espessura da lâmina de prata-óxido de estanho foi de 1,0 mm. A espessura da lâmina de cobre foi de 1,0 mm.

4.1.2.3 Latão / prata pura

Seguiu-se o mesmo procedimento estabelecido na seção 4.1.2.1, apenas trocando a lâmina de cobre por outra de latão. As dimensões permaneceram inalteradas:

- Latão: 43 x 15 x 1,0 mm;
- Prata pura: 45 x 15 x 1,0 mm;
- Região de apoio: 0,4 a 0,5 mm.

4.1.2.4 Latão / prata-óxido de estanho

Seguiu-se o mesmo procedimento estabelecido na seção 4.1.2.2, apenas trocando a lâmina de cobre por outra de latão. As dimensões permaneceram inalteradas:

- Latão: 43 x 15 x 1,0 mm;
- Prata-óxido de estanho: 45 x 15 x 1,0 mm;
- Região de apoio: 0,4 a 0,5 mm.

4.2 Preparação superficial dos metais de base

Após a obtenção das amostras em sua geometria final para ambos os ensaios, todas elas passaram por um processo de abrilhantamento a fim de propiciar a limpeza mais grosseira de óleo e graxa.

Este processo utilizou um composto desengraxante de base uréica, próprio para este tipo de operação, chamado: Composto Brill 613. Este produto foi diluído em água na proporção 50:1 e colocado junto à esferas maciças de aço com 4 mm de diâmetro, colocando-se assim o maquinário em funcionamento por cerca de 10 minutos. A quantidade de composto

diluído e o tempo de operação foram baseados na experiência prática de manuseio diário do equipamento.

Abaixo na Fig.4.1, segue imagens do maquinário utilizado neste tipo de operação, o qual é baseado na vibração dos elementos internos à caçamba emborrachada.

FIGURA 4.1 – Maquinário vibratório carregado com esferas de 4 mm de diâmetro.

Após os 10 minutos de operação os metais de base são retirados manualmente do equipamento, lavados em água corrente e secados com um soprador. Apenas os metais de base para o ensaio da gota séssil passam por processo de polimento até adquirirem um aspecto espelhado e rugosidade de $0,1\mu\text{m}$. Na seqüência, as bases para ambos os ensaios foram submetidas a um ciclo de 12 minutos no ultra-som, em um Becker com acetona.

4.3 Confecção dos metais de adição para os ensaios propostos

Segue abaixo as rotinas seguidas para a obtenção dos metais de adição, tanto para o ensaio da gota séssil quanto para o ensaio da cunha.

4.3.1 Metal de adição matriz

Como metal de adição matriz foi utilizado apenas uma opção de liga de prata, classificação BAg. Esta liga era do tipo Ag-Zn-Cd-Cu, conforme Tab.4.3. Apesar de conter cádmio, esta liga ainda é bastante utilizada na brasagem de contatos elétricos.

TABELA 4.3 – Composição química nominal do metal de adição utilizado.

Ag	Zn	Cd	Cu
40%	21%	20%	19%

O metal de adição matriz está na forma de fita com espessura de 0,20mm e largura de 15 mm. Suas temperaturas *solidus* e *liquidus* são respectivamente 595 e 630°C.

4.3.1.1 Metal de adição para os ensaios da gota sésil

Para estes ensaios confeccionaram-se pastilhas com diâmetro de 2,5 mm e espessura de 0,20 mm, obtidas pelo processo de estampagem a partir do metal de adição matriz. O diâmetro indicado foi estabelecido em função da dimensão dos metais de base para evitar o extravasamento de metal líquido para fora do substrato durante o ensaio da gota sésil.

4.3.1.2 Metal de adição para os ensaios da cunha

Para cada ensaio, utilizaram-se dois pedaços do próprio metal de adição matriz cortados com uma tesoura nas dimensões: 25 x 15 x 0,20 e 10 x 15 x 0,20 mm (C x L x E). Tal massa foi capaz de preencher com facilidade a folga estabelecida.

4.4 Preparação superficial dos metais de adição

Já em suas dimensões de ensaio, os metais de adição passaram por um ciclo de 12 minutos no ultra-som, em um Becker com acetona.

4.5 Pesagem dos elementos

Os corpos de prova, tanto para o ensaio da gota séssil quanto para o ensaio da cunha, foram pesados juntamente com seus respectivos metais de adição e seus elementos de fixação, em uma balança de precisão com 04 casas decimais.

4.5.1 Ensaio da gota séssil

Selecionou-se uma pastilha de metal de adição juntamente com um metal de base para cada ensaio que seria realizado.

O metal de adição foi pesado individualmente, e logo após, cada par foi pesado e a massa total registrada para futura averiguação de possíveis variações de massa durante o processo.

4.5.2 Ensaio da Cunha

Separou-se um par de lâminas do metal de adição com comprimentos diferentes (25 e 10 mm de comprimento) juntamente com as duas lâminas dissimilares (uma de cobre ou latão e outra de prata pura ou prata-óxido de estanho), e dois parafusos e duas porcas, para cada ensaio que seria realizado.

O metal de adição foi pesado individualmente, e logo após, cada conjunto foi pesado e a massa total registrada para averiguação de possíveis variações de massa durante o processo.

4.6 Aplicação de fluxo nos corpos de prova

Após a pesagem dos pares e dos conjuntos, apenas as faces dos metais de base que teriam contato com o metal de adição fundido receberam pinceladas de fluxo para prata, até que a superfície estivesse inteiramente protegida. O fluxo possuía consistência pastosa, a base de água e sais, com temperatura de ativação entre 539 a 831°C.

Os metais de adição receberam a aplicação do fluxo em ambos os lados. Esta aplicação foi realizada momentos antes à realização do ensaio para que o fluxo não causasse forte oxidação na superfície de ensaio, devido à presença de água no mesmo.

Como trabalhou-se com três repetições para cada parâmetro de ensaio, os metais de adição e os metais de base foram preparados em grupos de três, simultaneamente.

4.7 Montagem dos corpos de prova

4.7.1 Ensaio da gota sésil

Cada diferente metal de base (cobre, latão, prata pura, prata-óxido de estanho) recebeu no centro de sua superfície a colocação de uma pastilha de metal de adição. Abaixo, observa-se na Fig.4.2, exemplos dos corpos de prova fabricados em latão e cobre prontos para serem ensaiados.

FIGURA 4.2 - Corpos de prova em (a) latão e (b) cobre prontos para serem ensaiados.

4.7.2 Ensaio da cunha

Os conjuntos: cobre / prata pura, cobre / prata-óxido de estanho, latão / prata pura e latão / prata-óxido de estanho, receberam em seu “vão” a colocação dos dois pedaços de fita do metal de adição sobrepostos e foram aparafusados em uma das extremidades. Como exemplo, pode-se observar esta montagem no corpo de prova apresentado na Fig.4.3 abaixo:

FIGURA 4.3 - Corpo de prova para o ensaio da cunha; (a) amostra em: latão / prata pura, mais duas lâminas do metal de adição, desmontados e protegidos com fluxo, (b) amostra em: cobre / prata pura, após montagem.

4.8 Suporte para ensaio

Para que os corpos de prova apresentados acima pudessem ser ensaiados na máquina de brasagem por resistência, duas bases foram fabricadas em cobre eletrolítico com dimensões: 70 x 25 x 25 mm (C x L x E). Dois espaçadores, também em cobre eletrolítico, foram utilizados para que permitissem a inserção das amostras, tendo as seguintes dimensões: 25 x 11 x 6,4 mm (C x L x E). Ambos os ensaios utilizaram o mesmo suporte.

Logo abaixo da superfície onde as amostras foram assentadas, existia um furo para a acomodação de um termopar tipo K, que permitiria a leitura das temperaturas a que as amostras estavam sujeitas. Apresenta-se na Fig.4.4 o suporte utilizado:

FIGURA 4.4 – Suporte em cobre eletrolítico utilizado para a realização dos ensaios da gota sésil e da cunha.

4.9 Máquina manual de brasagem por resistência

O equipamento elétrico utilizado foi uma máquina de brasagem por resistência capaz de gerar 45 kVA.

A Fig.2.10 da seção 2.4.1.1-b apresenta o equipamento utilizado, porém ir-se-á reproduzir a imagem para facilitar o entendimento das demais abordagens. Assim, segue abaixo a imagem do equipamento, segundo Fig.4.5:

FIGURA 4.5 – Máquina de brasagem por resistência utilizada para realização dos ensaios.

O equipamento é composto por um braço móvel superior (A) e um braço fixo inferior (D) refrigerados a água. Deles, partem dois eletrodos (B e C) que se aproximam através da ação pneumática, acionada por um pedal (E) pela ação de um operador.

No eletrodo do braço inferior (C) existe uma base quadrada em cobre que suporta uma peça solta, fabricada em material de alta resistividade, neste caso, em eletrografite. Com a ação pneumática (E), o eletrodo (B) do braço móvel superior (A) tocará este bloco de eletrografite, permitindo assim que um segundo pedal (F) também acionado por um operador, acione um contactor magnético e feche o circuito elétrico, permitindo a circulação da energia produzida por um transformador.

Naturalmente, o bloco de alta resistividade irá dificultar a passagem da corrente elétrica aquecendo-se. Este calor gerado é que será conduzido a um conjunto a ser brasado. Assim, uma peça a ser brasada é posicionada sobre o bloco de eletrografite e tocada pelo eletrodo (B) do braço móvel superior (A), através do acionamento pneumático (E) e posterior acionamento do pedal elétrico (F).

Abaixo na Fig.4.6, mostra-se a montagem do suporte para os ensaios já no equipamento de brasagem por resistência.

FIGURA 4.6 – Suporte (X) montado sobre o bloco de eletrografite (Y) e pressionado pneumaticamente pelo eletrodo móvel superior (B) e o eletrodo fixo inferior (C).

4.9.1 Parâmetros para controle

O acionamento pneumático para a aplicação da pressão sobre o suporte de ensaio e a liberação da corrente de brasagem para a geração de calor, dependem de ações manuais que devem ser tomadas pelo operador do equipamento. Logo, as operações não são automatizadas e o manuseio exige muita habilidade.

O equipamento possui regulagem sobre a corrente a ser empregada e também sobre a força aplicada sobre o suporte.

Enquanto o operador aciona o contacto magnético através de um pedal, liberando a circulação da corrente elétrica, ele observa o metal de adição pré-posicionado. O aquecimento é mantido até que o metal de adição funda e comece a fluir pela junta. Neste instante, o contacto magnético é desligado, e logo após a solidificação do metal de adição, a ação pneumática é interrompida e o suporte retirado de sobre o eletrodo inferior para resfriar ao ar.

Para cada ensaio realizado utilizou-se um novo bloco de eletrografite, em função dos danos causados às propriedades elétricas devido às altas temperaturas atingidas (entre 800 e 1.100°C). A Tab.4.4 apresenta as propriedades de um bloco de eletrografite virgem. Os demais parâmetros fixados para o equipamento foram relacionados na Tab.4.5:

TABELA 4.4 – Propriedades gerais do bloco de eletrografite utilizado.

Dimensão (mm)	Densidade (Mg/m³)	Dureza (Shore)	Resistência Elétrica (mΩcm)	Resistência à Flexão (MPa)	Tamanho de Grão (mm)
50 x 25 x 25	1,8	80	16,5	75	5

TABELA 4.5 – Parâmetros gerais da máquina manual de brasagem por resistência.

Fabricação dos eletrodos	Cobre eletrolítico
Tempo de ciclo	Contado a partir da fusão do metal de adição
Acionamento e liberação da pressão pneumática	Manual
Força aplicada sobre o suporte	165 kg
Acionamento e liberação da corrente elétrica	Manual
Corrente de brasagem	15 kA
Resfriamento após solidificação	Água corrente

4.10 Variáveis

As variáveis operacionais acompanhadas durante os ensaios foram: temperatura de brasagem e tempo de exposição à mesma.

4.10.1 Ciclo de aquecimento e temperatura de brasagem

Definiu-se como temperatura T_1 de brasagem aquela necessária para que se visualizasse o início da fundição do metal de adição sobre os metais de base, cessando o aquecimento a partir deste instante. Em consequência, definiu-se também a duração deste ciclo de aquecimento, nomeado como C_1 .

A fim de se extrapolar esta condição, o ciclo C_2 perdurou aproximadamente três segundos a mais que o ciclo C_1 . À temperatura atingida no ciclo C_2 , nomeou-se de T_2 .

Uma terceira condição também foi estabelecida tendo o ciclo de aquecimento também aproximadamente três segundos a mais que C_2 e a temperatura atingida neste ciclo foi nomeada como T_3 .

Após os ciclos C_1 , C_2 e C_3 , o aquecimento foi cessado e todo sistema resfriou à temperatura ambiente.

Para os ensaios da gota sssil o perodo total de ensaio; do aquecimento ao resfriamento at aproximadamente 450C; transcorreu por: 140 segundos para o ciclo C_1 , 160 para o ciclo C_2 e 180 segundos para o ciclo C_3 .

Para os ensaios da cunha o perodo total de ensaio; do aquecimento ao resfriamento at aproximadamente 450C; transcorreu por: 200 segundos para o ciclo C_1 , 220 segundos para o ciclo C_2 e 230 segundos para o ciclo C_3 .

O aquecimento iniciava-se sempre que o suporte montado se encontrava a 40C.

4.10.2 Curvas de *temperatura x tempo*

Para cada ensaio realizado registrou-se a respectiva curva de *temperatura x tempo*.

Para isso, utilizou um registrador X-Y Hewlett Packard com parmetro de tempo para o eixo X e de fora eletromotriz captada do termopar tipo K, para o eixo Y. Os parmetros de regulagem do equipamento foram: 25 s/cm no eixo X e 2,5 mV/cm para o eixo Y.

Alm disso, utilizou-se um termmetro digital com entradas para termopares J e K.

Abaixo na Fig.4.7, segue imagem do registrador de temperatura e do termmetro.

FIGURA 4.7 – Registrador de temperaturas XY – HP e termmetro digital para termopares J e K.

Para cada curva que o registrador reproduziu, encontrou-se a respectiva curva de *temperatura x tempo*, e delas foram retirados os seguintes parâmetros segundo Fig.4.8:

T_{X_A} : taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C/s}$);

T_{X_R} : taxa de resfriamento ($^{\circ}\text{C/s}$);

$T_{M\acute{a}x}$: temperatura máxima de ensaio ($^{\circ}\text{C}$);

T_L : temperatura *liquidus* de fusão do metal de adição ($^{\circ}\text{C}$);

$\Delta T = T_{M\acute{a}x} - T_F$ ($^{\circ}\text{C}$);

t : tempo de ensaio no patamar da T_L (s);

FIGURA 4.8 – Demonstração gráfica dos parâmetros obtidos das curvas de *temperatura x tempo*, para ambos os ensaios.

4.10.3 Repetições

Realizaram-se três repetições para cada ciclo, tanto para o ensaio da gota séssil quanto para o ensaio da cunha. A Tab.4.6 esquematiza os ensaios e repetições realizadas, além do número total de amostras ensaiadas.

TABELA 4.6 – Quantificação dos ensaios e amostras produzidas.

Tipo de Ensaio	Metal de Base	Ciclo	Temperaturas (°C)	Repetições por Ciclo	Número de Amostras
Gota Sésil	Cobre	C_1	T_1	3x	3
		C_2	T_2	3x	3
		C_3	T_3	3x	3
	Latão	C_1	T_1	3x	3
		C_2	T_2	3x	3
		C_3	T_3	3x	3
	Prata pura	C_1	T_1	3x	3
		C_2	T_2	3x	3
		C_3	T_3	3x	3
	Prata-óxido de estanho	C_1	T_1	3x	3
		C_2	T_2	3x	3
		C_3	T_3	3x	3
Número total de amostras para ensaio da gota sésil					36
Cunha	Cobre / Prata pura	C_1	T_1	3x	3
		C_2	T_2	3x	3
		C_3	T_3	3x	3
	Cobre / Prata-óxido de estanho	C_1	T_1	3x	3
		C_2	T_2	3x	3
		C_3	T_3	3x	3
	Latão / Prata pura	C_1	T_1	3x	3
		C_2	T_2	3x	3
		C_3	T_3	3x	3
	Latão / Prata-óxido de estanho	C_1	T_1	3x	3
		C_2	T_2	3x	3
		C_3	T_3	3x	3
Número total de amostras para ensaio da cunha					36

4.11 Análises

4.11.1 Das amostras dos ensaios da gota sésil

4.11.1.1 Avaliação do espalhamento

Através das variações de diâmetros inicial e final, calculou-se o coeficiente de espalhamento do metal de adição após sua solidificação.

Durante o aquecimento, a pastilha de metal de adição com diâmetro (d_p) de 2,5 mm e espessura de 0,20 mm posicionada sobre um dos metais de base, sobrenada o fluxo fundido.

Quando a mesma atinge sua temperatura de fusão, a pastilha transformasse em uma semi-esfera com diâmetro aproximado de 1,30 mm e toca o substrato permitindo a interação.

Ao tocar o substrato, a esfera gera um ponto de contato com área medida igual a $7,0686.10^{-2} \text{ mm}^2$, resultante de um diâmetro aproximado de 0,30mm de contato com a superfície. A este diâmetro chamou-se de: d_0 .

A dinâmica do espalhamento pode ser visualizada na Fig.4.9:

FIGURA 4.9 – Esquema do espalhamento para ensaio da gota sésil, sendo: (a) d_p = diâmetro da pastilha de metal de adição; (b) d_0 = diâmetro inicial fundido e (c) d_f = diâmetro final solidificado.

Assim, com o auxílio de um paquímetro digital foi encontrado o diâmetro final solidificado (d_f) da massa já espalhada. Foi utilizada a média de quatro medições, colhidas conforme Fig.4.10.

FIGURA 4.10 – Esquema das medições realizadas para obtenção do diâmetro final solidificado (d_f).

Obteve-se então, o coeficiente de espalhamento, calculado segundo a equação Eq.26:

$$\text{Coeficiente de Espalhamento (\%)} = \frac{d_f - d_0}{d_0} \quad (26)$$

4.11.1.2 Medição do ângulo de contato

Os metais de base ensaiados foram também analisados no goniômetro a fim de medir-se o ângulo de contato resultante da interação entre o metal de adição e os substratos não-ferrosos.

Foram realizadas duas medições para cada amostra, conforme apresenta a Fig.4.11:

FIGURA 4.11 – Esquema das medições do ângulo de contato (θ_1 e θ_2), altura da gota (h) e raio da calota esférica (r).

O raio da calota esférica (r) foi determinado através da medição da altura da gota solidificada (h) com um paquímetro digital, e da posterior utilização de um software gráfico para que a relação do diâmetro final solidificado (d_f) e da altura da gota (h) revelasse o raio da calota esférica.

Para efeitos comparativos, calculou-se o valor do ângulo de contato teórico (θ_t), utilizando a Eq.27.

$$2 - 3.\cos \theta_t + \cos^3 \theta_t = \frac{M_p}{\rho_p \cdot \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^3} \quad (27)$$

Sendo:

- θ_t = ângulo de contato teórico (graus);
- M_p = massa da pastilha de metal de adição (gramas);
- ρ_p = densidade no estado líquido da pastilha de metal de adição (g/cm^3);
- r = raio da área de contato da gota (mm).

4.11.2 Das amostras do ensaio da cunha

4.11.2.1 Ensaios metalográficos

Os corpos de prova foram cortados longitudinalmente na região central, num equipamento de corte de precisão, alta rotação e com disco diamantado. Uma metade fora arquivada e a outra, embutida à frio e polida.

4.11.2.2 Ataque químico

Após a preparação, a amostra embutida passou por dois ataques consecutivos. Primeiramente, foi atacada durante cinco segundos em solução contendo: 25 ml de ácido nítrico, 1g de dicromato de potássio e 100 ml de água.

Na seqüência, foi atacada por mais cinco segundos em solução contendo: 40g de ácido crômico, 3g de sulfato de sódio e 200 ml de água.

Tais ataques revelaram as fases que foram observadas.

4.11.2.3 Microscopia eletrônica de varredura

As amostras do ensaio da gota sésil e da cunha foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura para que fossem encontradas e medidas as regiões de folga ideal. O *MEV* também foi empregado para determinar, semi-quantitativamente, através de micro-análise por dispersão de energia, a composição química das fases presentes na junta brasada, para os diferentes metais de base.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Obtidas todas as 72 amostras deu-se sequência à leitura, registro dos resultados e discussão.

5.1 Dos ensaios da gota sésil

5.1.1 Ciclos térmicos

Nas tabelas que se sucedem, apresentam-se uma série de dados térmicos obtidos da leitura das curvas de *temperatura x tempo* (vide anexo 1).

A Tab.5.1 mostra os resultados do ciclo térmico C_1 das amostras do ensaio da gota sésil para os metais de base: cobre, latão, prata pura e prata-óxido de estanho. Assim como, respectivamente, a Tab.5.2 para os ciclo C_2 e a Tab. 5.3 para o ciclo C_3 .

TABELA 5.1 – Ciclo térmico do ensaio da gota sésil para C_1 .

Ciclo	Metal de Base	Nº da Amostra	Tipo de Ensaio	T _{x A} (°C/s)	T _{Máx} (°C)	ΔT	T _{x E} (°C/s)	t (s)
C ₁	Cobre	1	Gota Sêssil	6,60	691,8	61,8	3,90	33,78
		2		8,58	704,8	74,8	4,52	30,77
		3		8,58	711,1	81,1	4,52	31,93
		Média			702,6	72,6 ± 9,8		32,16 ± 1,5
	Latão	10	Gota Sêssil	8,58	733,5	103,5	3,90	47,31
		11		7,15	715,0	85,0	4,09	38,23
		12		7,15	674,3	44,3	3,58	24,48
		Média			707,6	77,6 ± 30,3		36,67 ± 11,5
	Prata pura	19	Gota Sêssil	7,15	688,5	58,5	4,09	30,07
		20		6,13	705,6	75,6	4,77	34,50
		21		7,80	720,6	90,6	5,36	35,43
		Média			704,9	74,9 ± 16,1		33,33 ± 2,9
	Prata-óxido de estanho	28	Gota Sêssil	6,60	712,9	82,9	4,29	42,66
		29		8,58	733,4	103,4	4,77	42,19
		30		6,60	728,0	98,0	4,23	42,66
		Média			724,8	94,8 ± 10,6		42,50 ± 0,3

TABELA 5.2 – Ciclo térmico do ensaio da gota séssil para C_2 .

Ciclo	Metal de Base	Nº da Amostra	Tipo de Ensaio	T _{x A} (°C/s)	T _{Máx} (°C)	ΔT	T _{x E} (°C/s)	t (s)
C ₂	Cobre	4	Gota Séssil	4,52	752,8	122,8	2,96	48,95
		5		2,60	721,2	91,2	2,32	37,30
		6		5,05	679,3	49,3	2,68	53,85
		Média			717,8	87,8 ± 36,9		46,70 ± 8,5
	Latão	13	Gota Séssil	6,13	734,7	104,7	4,09	53,15
		14		7,80	738,3	108,3	4,42	60,37
		15		9,53	714,4	84,4	4,77	38,23
		Média			729,1	99,1 ± 12,9		50,58 ± 11,3
	Prata pura	22	Gota Séssil	9,32	747,4	117,4	4,77	44,29
		23		9,53	739,8	109,8	5,36	39,39
		24		7,80	734,1	104,2	4,38	44,06
		Média			740,4	110,5 ± 6,6		42,58 ± 2,8
	Prata-óxido de estanho	31	Gota Séssil	6,50	736,3	106,3	4,29	45,92
		32		7,66	749,4	119,4	5,36	46,39
		33		6,50	720,9	90,9	4,09	58,97
		Média			735,5	105,5 ± 14,3		50,43 ± 7,4

TABELA 5.3 – Ciclo térmico do ensaio da gota séssil para C_3 .

Ciclo	Metal de Base	Nº da Amostra	Tipo de Ensaio	T _{x A} (°C/s)	T _{Máx} (°C)	ΔT	T _{x E} (°C/s)	t (s)
C ₃	Cobre	7	Gota Séssil	4,77	767,2	137,2	3,18	52,21
		8		4,09	699,1	69,1	2,68	47,79
		9		4,77	774,7	144,7	2,68	27,97
		Média			747,0	117,0 ± 41,7		42,66 ± 12,9
	Latão	16	Gota Séssil	8,58	776,3	146,3	4,52	55,94
		17		6,13	739,5	109,5	4,09	51,05
		18		8,58	720,1	90,1	4,77	38,69
		Média			745,3	115,3 ± 28,5		48,56 ± 8,9
	Prata pura	25	Gota Séssil	6,60	701,3	71,3	3,73	30,54
		26		8,58	767,5	137,5	5,72	48,25
		27		7,80	771,6	141,6	4,77	54,08
		Média			746,8	116,8 ± 39,5		44,29 ± 12,3
	Prata-óxido de estanho	34	Gota Séssil	7,15	742,3	112,3	4,52	63,17
		35		8,58	777,1	147,1	4,52	61,77
		36		7,80	767,3	137,3	4,52	57,58
		Média			762,2	132,2 ± 17,9		60,84 ± 2,9

Através de avaliações estatísticas por ANOVA entre os ciclos C_1 , C_2 e C_3 dos metais de base e também entre as três repetições, aceitou-se com 95% de certeza a hipótese H_0 , de igualdade entre as médias dos valores registrados nas tabelas acima para todos os

ensaios da gota sssil realizados. Isso foi verificado nas variveis mais relevantes para o fenmeno em questo: ΔT e t .

Essa igualdade foi gerada pela disperso dos valores avaliados, associada ao processo de ensaio empregado. Alm disso, a rapidez com que ocorre o fenmeno de espalhamento de um lquido sobre um substrato tambm contribuiu para que as condies de estudo ficassem iguais. Nas Tab. 5.4 e 5.5 apresentam-se os resultados das avaliaes ANOVA realizadas.

TABELA 5.4 - Quadro da anlise ANOVA para ΔT das condies C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da gota sssil dos quatro metais de base.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F calculado	α	F_α
Entre amostras	1636,22	3,00	545,41	0,68	5,00%	2,92
Residual	25672,40	32,00	802,26			
Total	27308,63	35,00				

Concluso: $F_{\text{calculado}} < F_\alpha$; logo a hiptese H_o aceita, isto , todos os ΔT das condies C_1 , C_2 e C_3 , para todos os metais de base do ensaio da gota sssil, so iguais.

TABELA 5.5 - Quadro da anlise ANOVA para t das condies C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da gota sssil dos quatro metais de base.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F calculado	α	F_α
Entre amostras	734,83	3,00	244,94	2,60	5,00%	2,92
Residual	3011,45	32,00	94,11			
Total	3746,28	35,00				

Concluso: $F_{\text{calculado}} < F_\alpha$; logo a hiptese H_o aceita, isto , todos os t das condies C_1 , C_2 e C_3 , para todos os metais de base do ensaio da gota sssil, so iguais.

Como os ciclos trmicos nas condies C_1 , C_2 e C_3 foram iguais para os ΔT e t , foram feitas as mdias de todos os parmetros dos nove ensaios, para cada metal base estudado.

5.1.2 Variações de massa

Na Tab. 5.6 apresentam-se as leituras de massas e temperaturas obtidas para as amostras dos ensaios da gota sêssil.

TABELA 5.6 – Massas e temperaturas para ensaios da gota sêssil.

Tipo de Ensaio	Metal de Base	Nº da Amostra	Ciclo	ΔT	M _{Adição} (g)	M _{Total} (g)	M _{Final} (g)	Variação de Massa (%)
Gota Sêssil	Cobre	1	C1	61,8	0,0098	2,1048	2,1046	-0,010
		2		74,8	0,0098	2,1040	2,1035	-0,024
		3		81,1	0,0099	2,1098	2,1095	-0,014
		Média						-1,60 ± 0,01
		4	C2	122,8	0,0103	2,0862	2,0850	-0,058
		5		91,2	0,0104	2,0990	2,0979	-0,052
		6		49,3	0,0105	2,1673	2,1662	-0,051
		Média						-5,37 ± 0,00
		7	C3	137,2	0,0098	2,1012	2,1007	-0,024
		8		69,1	0,0099	2,1104	2,1098	-0,028
		9		144,7	0,0100	2,0717	2,0704	-0,063
		Média						-3,83 ± 0,02
	Latão	10	C1	103,5	0,0100	2,0393	2,0368	-0,123
		11		85,0	0,0099	2,0564	2,0548	-0,078
		12		44,3	0,0100	2,0652	2,0640	-0,058
		Média						-8,63 ± 0,03
		13	C2	104,7	0,0099	1,9846	1,9821	-0,126
		14		108,3	0,0100	1,9762	1,9740	-0,111
		15		84,4	0,0101	2,0623	2,0603	-0,097
		Média						-11,13 ± 0,01
		16	C3	146,3	0,0100	2,0053	2,0016	-0,185
		17		109,5	0,0010	2,0136	2,0105	-0,154
		18		90,1	0,0100	2,0473	2,0448	-0,122
		Média						-15,37 ± 0,03
	Prata pura	19	C1	58,5	0,0103	2,3039	2,3032	-0,030
		20		75,6	0,0103	2,2407	2,2402	-0,020
		21		90,6	0,0101	2,2304	2,2298	-0,030
		Média						-2,67 ± 0,01
		22	C2	117,4	0,0103	2,2341	2,2331	-0,040
		23		109,8	0,0102	2,2127	2,2120	-0,030
		24		104,2	0,0103	2,1480	2,1472	-0,040
		Média						-3,67 ± 0,01
		25	C3	71,3	0,0100	2,3065	2,3057	-0,030
		26		137,5	0,0102	2,2045	2,2038	-0,030
		27		141,6	0,0101	2,2331	2,2324	-0,030
		Média						-3,00 ± 0,00
	Prata- óxido de estanho	28	C1	82,9	0,0101	2,2891	2,2882	-0,040
		29		103,4	0,0103	2,2196	2,2180	-0,070
		30		98,0	0,0099	2,2436	2,2420	-0,070
		Média						-6,00 ± 0,02
		31	C2	106,3	0,0102	2,2586	2,2567	-0,080
		32		119,4	0,0100	2,2841	2,2831	-0,040
		33		90,9	0,0102	2,2916	2,2896	-0,090
		Média						-7,00 ± 0,03
		34	C3	112,3	0,0105	2,2771	2,2744	-0,120
		35		147,1	0,0103	2,3067	2,3039	-0,120
		36		137,3	0,0104	2,2815	2,2782	-0,140
		Média						-12,67 ± 0,01

As variações de massa foram, em média, mais significativas nos metais de base latão e prata-óxido de estanho, enquanto nos metais de base em cobre e prata pura, a queda foi menos significativa.

Isso pode ser devido à evaporação de alguns elementos presentes no metal de adição, que possuem alta pressão de vapor e baixa temperatura de fusão, como: o cádmio e o zinco. Como este elemento está presente tanto no metal de base como no metal de adição, as perdas no latão (liga Cu-Zn) são superiores às ocorridas no cobre eletrolítico e na prata pura.

Já nos substratos de prata-óxido de estanho, a variação se deu apenas pela perda destes elementos para a atmosfera.

É importante citar a influência do fluxo sobre uma parcela da variação da massa. Isso se deve à dissolução dos óxidos formados nas superfícies do substrato e do metal de adição durante o aquecimento, os quais serão retirados e eliminados juntamente com o fluxo. Essa parcela não foi ponderada, porém ela existe mesmo que em quantidades menos relevantes.

A questão da perda de massa no decorrer dos experimentos foi um ponto bastante crítico. O mesmo acabou limitando a realização dos ensaios em outros equipamentos, como um forno tipo mufla com atmosfera protetora e um forno a vácuo, conforme mostra a Fig. 5.1.

FIGURA 5.1 - (a) Forno elétrico tipo mufla com atmosfera de argônio; (b) forno elétrico a vácuo com atmosfera de argônio purificado, utilizados para a realização de ensaios preliminares.

Devido ao tamanho do forno tipo mufla, ao inserir as amostras, tendo o mesmo já em temperatura de ensaio, a vazão de argônio não foi suficiente para uniformizar rapidamente o interior do forno antes que o fluxo saturasse. Assim as superfícies oxidaram a ponto de descartarem o ensaio.

A variação de massa foi mais acentuada no forno a vácuo, preenchido com atmosfera de argônio purificado, onde as baixas rampas de aquecimento e os maiores períodos de exposição às temperaturas de brasagem, ocasionaram uma perda 10% maior que ao observado no ensaio com o equipamento de brasagem por resistência elétrica.

Na Tab. 5.7 apresentam-se as variações de massa em alguns ensaios iniciais desenvolvidos no forno a vácuo com atmosfera de argônio purificado.

TABELA 5.7 – Perdas de massa em amostras da gota séssil para forno a vácuo.

Tipo de Ensaio	Metal de Base	Teste	Variação de Massa	Temperatura máxima	Tempo de ensaio
Gota Séssil	Cobre	1	-10,00%	650,5°C	1h25min
		2	-10,00%		
		3	-10,00%		
	Latão	4	-19,00%		
		5	-18,00%		
		6	-20,00%		

5.1.3 Dimensionais

Foi lido em cada amostra do ensaio da gota séssil os respectivos diâmetros finais (d_f) e a altura da gota (h), do metal de adição solidificado sobre os substratos, conforme mostra a Tab. 5.8.

TABELA 5.8 – Diâmetros finais solidificados (d_f), ângulos de contato teóricos (θ_i) e coeficientes de espalhamento, para ensaios da gota sêssil.

Tipo de Ensaio	Metal de Base	Nº da Amostra	Ciclo	d_f (mm)	Coef. (%)	h (mm)	r (mm)	θ_z (°)	
Gota Sêssil	Cobre	1	C1	6,88 ± 0,2	95,64	0,06	98,64	10,20	
		2		6,73 ± 0,3	95,54	0,07	80,92	10,37	
		3		6,7 ± 0,3	95,52	0,07	80,2	10,42	
		Média			6,77 ± 0,1				10,3 ± 0,1
		4	C2	6,96 ± 0,1	95,69	0,08	75,73	10,10	
		5		7,66 ± 0,3	96,08	0,07	104,81	9,42	
		6		9,09 ± 0,7	96,7	0,04	258,23	8,37	
		Média			7,9 ± 0,3				9,3 ± 0,9
		7	C3	6,88 ± 0,1	95,64	0,08	74	10,20	
		8		7,23 ± 0,4	95,85	0,08	81,72	9,84	
		9		7,16 ± 0,8	95,81	0,07	91,58	9,87	
		Média			7,09 ± 0,4				10,0 ± 0,2
	Latão	10	C1	8,16 ± 0,3	96,32	0,07	118,94	8,93	
		11		7,19 ± 0,1	95,83	0,07	92,35	9,82	
		12		9,06 ± 0	96,69	0,06	171,04	8,30	
		Média			8,14 ± 0,2				9,0 ± 0,8
		13	C2	8,88 ± 0,2	96,62	0,06	164,31	8,34	
		14		9,22 ± 0,8	96,75	0,06	177,13	8,11	
		15		7,73 ± 0,2	96,12	0,06	124,52	9,32	
		Média			8,61 ± 0,3				8,6 ± 0,6
		16	C3	7,96 ± 0,1	96,23	0,06	132,03	9,06	
		17		9,38 ± 0,4	96,8	0,06	183,33	8,04	
		18		8,74 ± 0,2	96,57	0,07	136,44	8,50	
		Média			8,69 ± 0,2				8,5 ± 0,5
	Prata pura	19	C1	4,4 ± 0,2	93,18	0,13	18,68	14,60	
		20		5,22 ± 0,1	94,25	0,09	37,89	12,75	
		21		5,52 ± 0,1	94,56	0,09	42,36	12,22	
		Média			5,05 ± 0,1				13,2 ± 1,3
		22	C2	6,81 ± 0,2	95,59	0,07	82,85	10,44	
		23		6,35 ± 0,2	95,28	0,07	72,04	10,97	
		24		6,38 ± 0,3	95,3	0,05	101,79	10,85	
		Média			6,51 ± 0,1				10,8 ± 0,3
		25	C3	4,93 ± 0,2	93,91	0,1	30,43	13,41	
		26		6,94 ± 0,2	95,68	0,07	86,04	10,25	
		27		7,39 ± 0,2	95,94	0,05	136,56	9,82	
		Média			6,42 ± 0,0				11,2 ± 2,0
	Prata- óxido de estanho	28	C1	n.a.*	n.a.*	n.a.*	n.a.*	n.a.*	
		29							
		30							
		31	C2						
		32							
		33							
		34	C3						
		35							
		36							

n.a.* = não aplicável

Nos ensaios realizados sobre os substratos de prata-óxido de estanho, não foi possível a leitura dos diâmetros finais (d_f) em função da irregularidade geométrica encontrada e da presença de demolhamento. Em consequência disso, não foi possível definir também a altura da gota (h) e o ângulo de contato teórico (θ_t).

As medidas dos ângulos de contato experimental (θ_p) esbarraram em duas restrições: a baixa precisão do goniômetro ($0,5^\circ$) e a dificuldade operacional em conseguir-se um ajuste confiável para a leitura devido ao baixo aumento do campo, já que a baixa altura da gota (h) não gerava resolução suficiente para a regulação dos parâmetros necessários. Assim, optou-se por permanecer com os ângulos de contato calculados teoricamente (θ_t).

Através de avaliações estatísticas por ANOVA entre os ciclos C_1 , C_2 e C_3 dos ângulos de contato calculados teoricamente para os metais de base: cobre, latão e prata pura, com três repetições, rejeitou-se com 95% de certeza a hipótese H_0 , isto é, não há igualdade entre as médias dos valores registrados para os ângulos de contato teóricos (θ_t).

Na Tab. 5.9 apresenta-se os resultados da avaliação ANOVA realizada.

TABELA 5.9 - Quadro da análise ANOVA para o ângulo de contato calculado teoricamente (θ_t) das condições C_1 , C_2 e C_3 , para os ensaios da gota séssil, em: cobre, latão e prata pura.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F calculado	α	F α
Entre amostras	40,88	2,00	20,44	17,91	5,00%	3,66
Residual	27,38	24,00	1,14			
Total	68,26	26,00				

Retornando à Tab. 5.8, observa-se que para os três metais de base (cobre, latão e prata pura), o coeficiente de espalhamento médio foi maior que 95% caracterizando uma ótima condição de espalhamento sobre estes substratos. Este comportamento não foi

observado nos metais de base em prata-óxido de estanho, pelos motivos expostos anteriormente.

Nota-se também que os diâmetros finais (d_f) e os ângulos de contato teóricos (θ_t) foram diretamente influenciados pela interação entre os metais de base e a adição fundida, já que estatisticamente os tempos e os ciclos térmicos foram aceitos como iguais, em média. Assim, o latão apresentou um diâmetro final (d_f) maior que o cobre e que a prata.

Uma provável explicação para a maior dimensão nos diâmetros finais (d_f) dos metais de base em latão pode ser devido à presença de zinco no metal de base e no metal de adição. Este elemento difunde para a superfície livre do substrato, que está em contato com o metal de adição líquido. Paralelamente, na superfície sólido/líquido ocorre a dissolução do metal de base no metal de adição líquido. Consequentemente, a máxima solubilidade sólida e a composição do líquido em contato com o sólido também irão influenciar na alteração da composição química do líquido, até atingir a composição de equilíbrio do mesmo. A Tab. 5.10 mostra a distância de difusão de diferentes pares presentes neste estudo, calculadas nas condições de brasagem, supondo uma temperatura média de 730°C e 45 s de brasagem. A Tab. 5.11 apresenta a máxima solubilidade sólida e a composição do líquido em equilíbrio para sistemas binários a bases de prata, na temperatura de brasagem.

TABELA 5.10 – Dados das constantes de difusão e cálculo da distância de difusão de diferentes pares de elementos presentes nos ensaios de brasabilidade ⁽⁴¹⁾.

	Ag na Ag	Cd na Ag	Cu na Ag	Zn na Ag	Zn no Cu	Cd no Cu
Q (cal/mol)	45200	41690	46100	41700	47500	45700
Do (cm/s)	0,67	0,44	1,23	0,54	0,73	0,935
	Distância de difusão (μm)*					
Gota séssil	0,832	1,663	0,894	1,838	0,481	0,864

* Temperatura de 730°C e tempo de 45s.

A análise da Tab. 5.10 mostra que as distâncias de difusão do Zn na Ag e do Cd na Ag são praticamente duas vezes a distância de difusão dos outros sistemas apresentados na Tab. 5.10. Já o Zn no Cu, apresenta a menor distância de difusão.

TABELA 5.11 – Tensão superficial líquido vapor para os elementos que compõe a adição de brasagem na temperatura de fusão do Cu (1083 °C) ⁽⁴²⁾.

Elemento	γ_{LV} (mN/m)	T (°C)	$d(\gamma_{LV})/dT$ (mN/m.°C)x10 ⁻⁴	$\gamma_{LV1083}^{\circ C}$ (mN/m)
Ag	0,895	895	-2	0,857
Cu	1,3	1083	-4,5	1,3
Zn	0,77	420	-1,7	0,657
Cd	0,59	321	-1,4	0,483

TABELA 5.12 – Solubilidade sólida máxima e composição do líquido em equilíbrio do Cu, Zn e do Cd na Ag na temperatura média dos ensaios de caracterização da brasabilidade (730°C) ⁽⁴³⁾.

	Sólido (%)	Líquido (%)
Cu na Ag	7	n.a.
Zn na Ag	19,3	23,7
Cd na Ag	37,2	47,2

Outro ponto a ser observado é praticamente a inexistência de uma camada de óxido estável sobre a prata pura à temperatura de brasagem, fator este que torna possível trabalhá-lo em temperaturas de brasagem superiores, sem sobrecarregar a ação do fluxo de brasagem.

Já os óxidos de cobre e de zinco são termodinamicamente mais estáveis e, conseqüentemente, mais resistentes à ação do fluxo para se dissolverem ⁽⁴³⁾. Muitas vezes ocasionam o surgimento de pontos de oxidação em função da saturação ou ação química do fluxo, que atrapalham a cinética do espalhamento devido às alterações nas energias de superfície e que podem causar o demolhamento.

A seguir são apresentadas as Fig. 5.2 e 5.3, que foram tiradas na linha de contato das gotas solidificadas, a fim de ilustrarem a interação entre o metal de adição e o metal de base. Interação esta, que influencia diretamente o ângulo de contato, a altura e o diâmetro da gota. O plano de observação para as Fig. 5.2 e 5.3 está apresentado no topo da Fig. 5.2, após a realização do corte A-A, polimento e ataque.

FIGURA 5.2 – Fotografia na linha de contato do ensaio da gota sésil empregando (a) cobre eletrolítico e (b) latão (MEV).

FIGURA 5.3 Fotografia na linha de contato do ensaio da gota sésil empregando (a) prata pura; (b) e prata + 10%SnO₂ (MEV).

As Fig. 5.2(a) e (b) mostram que a interação é pouco acentuada, uma vez que a superfície livre do substrato sólido e da interface gota/substrato são praticamente as mesmas.

Já para as Fig. 5.3(a) e (b) o comportamento é um pouco diferente. Na Fig. 5.3(a) ocorre o fenômeno de “erosão” do metal de base, pelo metal de adição líquido. Neste caso, o líquido penetra no sólido, devido às diferenças de solubilidade entre os elementos químicos presentes, dificultando as medidas de ângulo de contato, convencionalmente medidas no ensaio da gota séssil. A Fig. 5.3(b) mostra uma região demolhada, através de uma pequena depressão central, abaixo da linha pontilhada. O substrato é a prata com 10% de SnO_2 . A densidade do óxido de estanho é de 6,90 a 7,00 g/cm^3 ⁽⁴⁵⁾ e possui um ponto de fusão de 1630°C. Comparando-se a densidade do óxido de estanho com a da adição líquida (aproximadamente de 8,5 a 9,0 g/cm^3) nota-se que, caso ocorra a fusão, o óxido de estanho irá para a superfície líquido/vapor, alterando completamente as propriedades do líquido, que passa a ser uma dispersão de óxido de estanho na adição líquida. A depressão no centro da região demolhada é um indício deste fenômeno.

5.1.4 Aspecto visual dos ensaios da gota séssil

Nos ensaios da gota séssil utilizando como metal de base a prata-óxido de estanho, notaram-se regiões em todos os corpos de prova em que o metal de adição demolhou o substrato, conforme explanado anteriormente.

Em função das grandes quantidades de prata, tanto no metal de adição (40%Ag) quanto no metal de base (90%Ag), os materiais interagiram inicialmente, ocorrendo o molhamento e o posterior demolhamento, conforme abordado anteriormente.

Nas Fig. 5.4 e 5.5 apresenta-se o aspecto visual das amostras da gota séssil ensaiadas, tendo como metal de base, prata-óxido de estanho.

FIGURA 5.4 – Imagem de amostra do ensaio da gota sésil em metal de base prata-óxido de estanho.

FIGURA 5.5 – Imagem aumentada do ensaio da gota sésil em metal de base prata-óxido de estanho apresentado regiões demolhadas.

Já para os ensaios realizados com metais de base em cobre, latão e prata pura, os resultados seguiram como esperados.

Apresenta-se na Fig. 5.6, fotografias dos corpos de prova ensaiados para a gota sésil em metais de base em cobre, latão e prata pura. A visão das imagens da Fig.5.6 era a mesma da utilizada nas Fig.5.4 e 5.5, porém com maior aumento.

FIGURA 5.6 – Imagem aumentada do ensaio da gota sésil em metais de base: (a) cobre; (b) Latão e (c) prata pura.

Observando-se as fotografias mostradas na Fig. 5.6 percebe-se um halo que circunda a gota. Foi feita uma micro-análise semi-quantitativa por *EDS* para determinar a composição química desta região. Os resultados mostraram que existe um enriquecimento em cádmio e um empobrecimento de Cu e Zn. Os valores de O são devidos à oxidação superficial da peça. A Tab. 5.13 apresenta os resultados desta análise.

TABELA 5.13 – Composição química de região do halo que circunda a gota, para o cobre eletrolítico como substrato.

Elementos	%	% at.
Ag	48,42	32,24
Cu	15,99	18,07
Zn	4,83	5,31
Cd	22,42	14,33
Sn	1,89	1,14
O	6,44	28,91

5.1.5 Microscopia eletrônica de varredura e micro-análises químicas por dispersão de energia.

5.1.5.1 Identificação de fases

Nas Fig. 5.7 a 5.10 são apresentadas as imagens das microestruturas e as composições químicas das fases presentes nos ensaios da gota sésil realizados. Serão apresentadas as microscopias nos metais de base, respectivamente em: cobre eletrolítico, latão, prata pura e prata-óxido de estanho.

As análises foram realizadas nos pontos A, B, C e D identificados na Fig.5.7, localizados na região central da gota solidificada.

Tendo como substrato o cobre eletrolítico, observou-se a formação das fases α_1 , α e β_y no metal de adição nos pontos identificados, através da comparação das porcentagens

atômicas obtidas através das micro-análises por *EDS*, comparadas com as composições químicas retiradas da literatura e observadas na Tab. 5.14.

TABELA 5.14 - Quadro de composições químicas e fases, fornecida pela literatura ⁽³⁸⁻⁴⁰⁾.

	α	α_1	β_x	β_y	γ	γ_1
	% at.	% at.	% at.	% at.	% at.	% at.
Ag	3,09	55,95	5,02	46,04	5,74	37,83
Cd	2,37	21,13	2,41	26,85	3,68	41,75
Cu	62,93	7,79	52,19	10,73	37,92	4,82
Zn	31,60	15,13	40,38	16,38	52,66	15,60

	A		B		C		D	
	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.
Fase	α_1		α		β_y		Interface Adição/Cu	
Ag	59,71	56,05	5,96	3,65	56,66	51,72	26,50	18,93
Cd	28,75	25,90	1,37	0,81	27,42	24,01	13,83	9,48
Cu	3,96	6,32	63,56	66,11	6,60	10,23	36,88	44,72
Zn	7,58	11,74	29,11	29,43	9,32	14,04	22,79	26,87

FIGURA 5.7 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da gota séssil – metal de base (MB): cobre eletrolítico.

As análises foram realizadas nos pontos A, B, C e D identificados na Fig.5.8, localizados na região central da gota solidificada.

Tendo como substrato o latão, observou-se a formação das fases $\alpha_1 + \beta_x$, α e α_1 no metal de adição nos pontos identificados, através da comparação das porcentagens atômicas obtidas através das micro-análises por EDS, comparadas com as composições químicas retiradas da literatura e observadas na Tab. 5.14 acima.

A fase $\alpha_1 + \beta_x$ no ponto A foi assim identificadas em função da composição média das fases que compõe um eutético.

Fase	A		B		C		D	
	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.
	$\alpha_1 + \beta_x$		α		α_1		α	
Ag	26,50	18,93	7,21	4,44	58,53	55,95	3,99	2,42
Cd	13,83	9,48	1,30	0,77	32,62	29,93	0,45	0,26
Cu	36,88	44,72	59,74	62,50	3,42	5,55	61,90	63,67
Zn	22,79	26,87	31,75	32,29	5,43	8,57	33,65	33,65

FIGURA 5.8 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da gota sésil – metal de base (MB): latão.

As análises foram realizadas nos pontos A, B e C identificados na Fig.5.9, localizados na região central da gota solidificada.

Tendo como substrato a prata pura, observou-se a formação da fase α_1 no metal de adição nos pontos identificados, através da comparação das porcentagens atômicas obtidas através das micro-análises por *EDS*, comparadas com as composições químicas retiradas da literatura e observadas na Tab. 5.14 acima.

As fases ricas em cobre, zinco ou cádmio não foram identificadas em função da ação do ataque químico realizado.

Fase	A		B		C	
	%	% at.	%	% at.	%	% at.
	α_1		α_1		α_1	
Ag	78,33	73,04	75,72	69,78	74,28	68,40
Cd	10,28	9,20	10,93	9,66	12,16	10,74
Cu	5,50	8,70	5,67	8,87	5,62	8,79
Zn	5,89	9,06	7,69	11,70	7,94	12,07

FIGURA 5.9 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da gota sêssil – metal de base (MB): prata pura.

As análises foram realizadas nos pontos A e B identificados na Fig.5.10, localizados na região central da gota solidificada.

Tendo como substrato a prata-óxido de estanho, observou-se a formação da fase α_1 e β_y no metal de adição nos pontos identificados, através da comparação das porcentagens atômicas obtidas através das micro-análises por *EDS*, comparadas com as composições químicas retiradas da literatura e observadas na Tab. 5.14 acima.

Ao longo da interface metal de adição / prata-óxido de estanho, observou-se a formação de pontos escurecidos atacados em demasia, ricos em cobre, zinco e cádmio.

Fase	A		B	
	%	% at.	%	% at.
	α_1		β_y	
Ag	82,69	78,84	78,81	74,48
Cd	9,65	8,83	12,03	10,91
Cu	6,16	9,97	7,24	11,62
Zn	1,50	2,37	1,92	2,99

FIGURA 5.10 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da gota sêssil – metal de base (MB): prata-óxido de estanho.

5.2 Dos ensaios da cunha

5.2.1 Ciclos térmicos

Nas tabelas abaixo, apresentam-se uma série de dados térmicos obtidos da leitura das curvas de *temperatura x tempo* (vide anexo 2), para o ensaio da cunha. Desde a Tab. 5.15 a 5.17, mostram os resultados dos ciclos térmicos C_1 , C_2 e C_3 das amostras do ensaio da cunha para os metais de base: cobre / prata pura, cobre / prata-óxido de estanho, latão / prata pura e latão / prata-óxido de estanho.

TABELA 5.15 – Ciclo térmico do ensaio da cunha para C_1 .

Ciclo	Metal de Base	Nº da Amostra	Tipo de Ensaio	T _{x A} (°C/s)	T _{Máx} (°C)	ΔT	T _{x R} (°C/s)	t (s)
C ₁	Cobre / Prata pura	37	Cunha	4,52	727,0	97,0	4,29	55,24
		38		6,60	692,9	62,9	4,52	44,52
		39		9,53	730,0	100,0	4,29	52,68
		Média				86,6 ± 20,6		50,81 ± 5,6
	Cobre / Prata-óxido de estanho	46	Cunha	4,29	696,8	66,8	3,43	48,48
		47		5,72	695,0	65,0	4,09	40,09
		48		5,36	688,8	58,8	4,09	39,39
		Média				63,5 ± 4,2		42,65 ± 5,1
	Latão / Prata pura	55	Cunha	5,04	701,6	71,6	4,09	40,56
		56		5,11	724,8	94,8	4,77	47,79
		57		5,11	733,7	103,7	5,23	50,58
		Média				90,0 ± 16,6		46,31 ± 5,2
	Latão / prata-óxido de estanho	64	Cunha	3,90	691,3	61,3	4,09	41,96
		65		4,29	678,2	48,2	3,9	36,83
		66		5,52	700,5	70,5	4,09	41,49
		Média				60,0 ± 11,2		40,09 ± 2,8

TABELA 5.16 – Ciclo térmico do ensaio da cunha para C_2 .

Ciclo	Metal de Base	Nº da Amostra	Tipo de Ensaio	T _{x A} (°C/s)	T _{Máx} (°C)	ΔT	T _{x R} (°C/s)	t (s)
C ₂	Cobre / Prata pura	40	Cunha	5,56	728,4	98,4	5,72	68,07
		41		5,05	724,4	94,4	4,05	56,18
		42		4,77	716,9	86,9	4,38	53,85
		Média				93,2 ± 5,8		59,37 ± 7,6
	Cobre / Prata-óxido de estanho	49	Cunha	5,36	720,6	90,6	4,52	57,11
		50		5,72	711,2	81,2	4,52	44,52
		51		5,05	697,7	67,7	4,29	42,42
		Média				79,8 ± 11,5		48,02 ± 7,9
	Latão / Prata pura	58	Cunha	4,88	761,7	131,7	4,99	61,07
		59		4,47	733,4	103,4	4,56	54,55
		60		4,38	729,2	99,2	4,38	53,61
		Média				111,4 ± 17,7		56,41 ± 4,1
	Latão / prata-óxido de estanho	67	Cunha	4,52	702,5	72,5	4,29	51,28
		68		5,72	705,8	75,8	4,29	41,49
		69		4,52	698,1	68,1	4,29	44,52
		Média				72,1 ± 3,9		45,76 ± 5,0

TABELA 5.17 – Ciclo térmico do ensaio da cunha para C_3 .

Ciclo	Metal de Base	Nº da Amostra	Tipo de Ensaio	T _{x A} (°C/s)	T _{M_{ax}} (°C)	ΔT	T _{x E} (°C/s)	t (s)
C ₃	Cobre / Prata pura	43	Cunha	4,77	740,8	110,8	5,36	54,78
		44		5,65	749,3	119,3	4,47	58,28
		45		5,36	754,7	124,7	4,99	61,54
		Média					118,3 ± 7,0	
	Cobre / Prata-óxido de estanho	52	Cunha	4,52	715,0	85,0	4,29	51,98
		53		4,77	709,4	79,4	4,09	49,65
		54		5,36	729,8	99,8	3,73	55,24
		Média					88,1 ± 10,5	
	Latão / Prata pura	61	Cunha	3,90	737,6	107,7	4,21	62,00
		62		4,99	755,4	125,4	5,23	58,74
		63		5,23	764,4	134,4	5,11	62,70
		Média					122,5 ± 13,6	
	Latão / prata-óxido de estanho	70	Cunha	3,58	705,7	75,7	3,83	50,35
		71		3,76	722,3	92,3	3,9	61,30
		72		5,23	725,2	95,3	4,13	51,98
		Média					87,8 ± 10,6	

Nas Tab. 5.18 a 5.21 apresentam-se os resultados das avaliações ANOVA realizadas para o ΔT e o t para todos os ciclos térmicos e materiais estudados.

TABELA 5.18 - Quadro da análise ANOVA para ΔT das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da cunha, em: cobre / prata pura e latão / prata pura.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F calculado	α	F_α
Entre amostras	333,68	1,00	333,68	0,91	5,00%	4,49
Residual	5864,46	16,00	366,53			
Total	6198,15	17,00				

Conclusão: $F_{\text{calculado}} < F_\alpha$; logo a hipótese H_0 é aceita, isto é, os ΔT das condições C_1 , C_2 e C_3 , para os metais de base, em: cobre / prata pura e latão / prata pura, do ensaio da cunha, são iguais.

TABELA 5.19 - Quadro da análise ANOVA para ΔT das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da cunha, em: cobre / prata-óxido de estanho e latão / prata-óxido de estanho.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F calculado	α	F_α
Entre amostras	66,51	1,00	66,51	0,34	5,00%	4,49
Residual	3124,32	16,00	195,27			
Total	3190,83	17,00				

Conclusão: $F_{\text{calculado}} < F_\alpha$; logo a hipótese H_0 é aceita, isto é, os ΔT das condições C_1 , C_2 e C_3 , para os metais de base, em: cobre / prata-óxido de estanho e latão / prata-óxido de estanho, do ensaio da cunha, são iguais.

TABELA 5.20 - Quadro da análise ANOVA para t das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da cunha, em: cobre / prata pura e latão / prata pura.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F calculado	α	F_α
Entre amostras	10,19	1,00	10,19	0,21	5,00%	4,49
Residual	770,97	16,00	48,19			
Total	781,16	17,00				

Conclusão: $F_{\text{calculado}} < F_\alpha$; logo a hipótese H_0 é aceita, isto é, os t das condições C_1 , C_2 e C_3 , para os metais de base, em: cobre / prata pura e latão / prata pura, do ensaio da cunha, são iguais.

TABELA 5.21 - Quadro da análise ANOVA para t das condições C_1 , C_2 e C_3 , para ensaios da cunha, em: cobre / prata-óxido de estanho e latão / prata-óxido de estanho.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F calculado	α	F_α
Entre amostras	3,28	1,00	3,28	0,07	5,00%	4,49
Residual	787,24	16,00	49,20			
Total	790,52	17,00				

Conclusão: $F_{\text{calculado}} < F_\alpha$; logo a hipótese H_0 é aceita, isto é, os t das condições C_1 , C_2 e C_3 , para os metais de base, em: cobre / prata-óxido de estanho e latão / prata-óxido de estanho, do ensaio da cunha, são iguais. Assim, novamente as interferências geradas pelas dispersões fizeram com que ΔT e t fossem iguais, aos pares.

O aumento de massa dos corpos de prova do ensaio da cunha, quando comparado com a massa dos corpos de prova do ensaio da gota sssil, gerou resultados um pouco diferentes de ΔT e t , devido influncia da inrcia trmica e da condutividade trmica dos metais de base. Fato este no sentido nos ensaios da gota sssil, pois os mesmos possuam massa total aproximadamente sete vezes menor. Caso as massas dos corpos de prova do ensaio da gota sssil fossem mais prximas s massa dos corpos de prova do ensaio da cunha, seriam grandes a possibilidades de que os ΔT e os t fossem estatisticamente iguais.

Embora os resultados dos ciclos trmicos do ensaio da cunha e da gota sssil sejam estatisticamente diferentes, com 5% de significncia, existe uma subreposio quando da comparao das disperses dos resultados, mostrando que, embora diferentes, os valores mdios no esto muito distantes entre si. Isso pode ser percebido analisando as disperses da Fig.5.11.

FIGURA 5.11 – Grafico de barras apresentando os valores de desvio mximo, mdia e desvio mnimo para o superaquecimento (ΔT) dos ciclos C1, C2 e C3 para as amostras do ensaio da cunha e da gota sssil.

5.2.2 Variações de massa

Na Tab. 5.22 apresentam-se as leituras de massas e temperaturas obtidas para as amostras dos ensaios da cunha.

TABELA 5.22 – Massas e temperaturas para ensaios da cunha.

Tipo de Ensaio	Metal de Base	Nº da Amostra	Ciclo	$\Delta T (^{\circ}C)$	M _{Adição} (g)	M _{Total} (g)	M _{Fmol} (g)	Variação de Massa (%)	
Cunha	Cobre / Prata pura	37	C1	97,0	1,1151	14,3694	14,3649	-0,03	
		38		62,9	1,0534	14,4087	14,4071	-0,01	
		39		100,0	1,0315	14,3894	14,4007	0,08	
		Média							1,33 ± 0,06
		40	C2	66,8	1,0622	14,2561	14,4290	1,20	
		41		65,0	1,0961	14,3148	14,2511	-0,45	
		42		58,8	1,0888	14,4288	14,3146	-0,80	
		Média							-1,67 ± 1,07
		43	C3	71,6	1,1079	14,3844	14,3782	-0,04	
		44		94,8	1,0781	14,3867	14,3851	-0,01	
		45		103,7	1,0799	14,4453	14,4437	-0,01	
		Média							-2,00 ± 0,02
	Cobre / Prata-óxido de estanho	46	C1	61,3	1,0725	14,5732	14,5673	-0,04	
		47		48,2	1,0240	14,2571	14,2522	-0,03	
		48		70,5	1,0361	14,4741	14,4799	0,04	
		Média							-1,00 ± 0,04
		49	C2	98,4	1,0712	14,3574	14,3475	-0,07	
		50		94,4	1,0858	14,2839	14,3134	0,21	
		51		86,9	1,0688	14,3931	14,4231	0,21	
		Média							11,67 ± 0,16
		52	C3	90,6	1,0231	14,3610	14,3500	-0,08	
		53		81,2	1,0779	14,4182	14,4528	0,24	
		54		67,7	1,0833	14,4828	14,4844	0,01	
		Média							5,67 ± 0,17
	Latão / Prata pura	55	C1	131,7	1,1073	14,3411	14,3377	-0,02	
		56		103,4	1,1093	14,2614	14,2557	-0,04	
		57		99,2	1,0811	14,2165	14,2148	-0,01	
		Média							-2,33 ± 0,02
		58	C2	72,5	1,0547	14,3484	14,3451	-0,02	
		59		75,8	1,0843	14,2806	14,2756	-0,04	
		60		68,1	1,0888	14,3489	14,3485	0,00	
		Média							-2,00 ± 0,02
		61	C3	110,8	1,0902	14,2884	14,2751	-0,09	
		62		119,3	1,0396	14,1795	14,1709	-0,06	
		63		124,7	1,0591	14,3291	14,3170	-0,08	
		Média							-7,67 ± 0,02
	Latão / Prata-óxido de estanho	64	C1	85,0	1,1009	14,3917	14,3926	0,01	
		65		79,4	1,0349	14,2515	14,2564	0,03	
		66		99,8	1,0374	14,2373	14,2645	0,19	
		Média							7,67 ± 0,10
		67	C2	107,7	1,0817	14,2623	14,2841	0,15	
		68		125,4	1,0505	14,1886	14,2151	0,19	
		69		134,4	1,1000	14,2387	14,2669	0,20	
		Média							18,00 ± 0,03
		70	C3	75,7	1,0863	14,2633	14,2781	0,10	
		71		92,3	1,0978	14,3513	14,3784	0,19	
		72		95,3	1,0896	14,4283	14,4526	0,17	
		Média							15,33 ± 0,05

Nota-se na Tab. 5.22 uma queda nas massas dos corpos de prova pelas razões citadas anteriormente. Da mesma forma, esta perda é superior nos corpos que possuem o latão como metal de base. Porém, o mais evidente é o ganho de massa na maioria dos corpos de prova.

Isso se deve à geometria em cunha que dificulta a retirada do fluxo resfriado e endurecido, permanecendo assim retido na região da cunha durante a pesagem final.

Este ganho é mais sensível nos corpos de prova com a prata-óxido de estanho onde o molhamento prejudicado dificulta a expulsão do fluxo pelo metal de adição fundido, permanecendo no interior da junta.

5.2.3 Identificação de fases

São apresentadas a seguir as imagens dos ensaios da cunha realizados, como também as composições químicas das áreas de interesse.

Além disso, medições foram realizadas nas áreas de interesse para que fosse possível estimar a região de folga ideal.

Na sequência serão apresentadas as microscopias nos metais de base, respectivamente em: cobre / prata pura, cobre / prata-óxido de estanho, latão / prata pura e latão / prata-óxido de estanho.

O plano de observação para todos os corpos de prova do ensaio da cunha é apresentado abaixo, após a realização do corte A-A, polimento e ataque. A área de observação não pertencia à região de folga ideal, já que deixava-se observar a formação de fase eutética.

As análises foram realizadas nos pontos A, B, C, D, E e F identificados na Fig.5.12, localizados a frente da região de folga máxima ideal.

Tendo como metais de base cobre / prata pura, observou-se a formação das fases α_1 e β_y nos pontos identificados, através da comparação das porcentagens atômicas obtidas através das micro-análises por *EDS*, comparadas com as composições químicas retiradas da literatura e observadas na Tab. 5.14 acima.

	A		B		C		D		E		F	
	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.
Fase	Metal base Ag		α_1		β_y		α_1		Interface Adição/Cu		Metal de base Cu	
Ag	96,62	95,15	65,52	58,44	58,02	50,71	65,90	59,53	15,28	9,79	1,00	0,59
Cd	1,03	0,97	15,50	13,27	19,19	16,10	17,03	14,76	3,66	2,25	0,39	0,22
Cu	1,24	2,08	8,40	12,71	7,79	11,56	6,21	9,53	74,85	81,40	96,87	97,48
Zn	1,11	1,80	10,59	15,58	14,99	21,63	10,86	16,18	6,21	6,65	1,75	1,71

FIGURA 5.12 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da cunha – metal de base: cobre / prata pura.

As análises foram realizadas nos pontos A, B, C, D e E identificados na Fig.5.13, localizados a frente da região de folga máxima ideal.

Tendo como metais de base cobre / prata-óxido de estanho, observou-se a formação das fases α_1 e α nos pontos identificados, através da comparação das porcentagens atômicas obtidas através das micro-análises por EDS, comparadas com as composições químicas retiradas da literatura e observadas na Tab. 5.14 acima.

Da mesma forma que na amostra de prata-óxido de estanho do ensaio da gota sêssil, observou-se a faixa escurecida rica em cobre, zinco e cádmio na interface Ag-10%SnO₂ e o metalde adição. A mesma se forma em toda interface a partir da folga zero.

	A				B		C		D		E	
	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.
Fase	Metal base AgSnO ₂		Metal base Ag		α_1		α_1		α		Interface Adição/Cu	
Ag	70,61	55,34	96,76	94,72	69,61	64,34	66,45	61,05	19,18	12,75	24,60	16,62
Cd	1,76	1,32	0,00	0,00	17,05	15,13	19,13	16,87	6,31	4,03	5,60	3,63
Cu	0,83	1,10	1,19	1,97	4,35	6,82	5,11	7,97	45,92	51,84	60,81	69,73
Zn	1,43	1,85	2,05	3,31	8,99	13,71	9,31	14,11	28,60	31,38	8,99	10,02
Sn	20,49	14,60										
O	4,88	25,78

FIGURA 5.13 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da cunha – metal de base: cobre / prata-óxido de estanho.

As análises foram realizadas nos pontos A, B, C, D e E identificados na Fig.5.14, localizados a frente da região de folga máxima ideal.

Tendo como metais de base latão / prata pura, observou-se a formação das fases α e α_1/β_y nos pontos identificados, através da comparação das porcentagens atômicas obtidas através das micro-análises por *EDS*, comparadas com as composições químicas retiradas da literatura e observadas na Tab. 5.14 acima.

A fase α_1/β_y foi assim identificada em função da igualdade entre as micro-análises e as porcentagens dos elementos apresentados na Tab.5.14. Como não foi possível definir com segurança de qual fase se tratava, apresentaram-se as duas possibilidades.

	A		B		C		D		E		F	
	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.
Fase	Metal de base Ag		α		α_1 / β_y		α_1 / β_y		Interface Adição/Latão		Metal de base latão	
Ag	97,07	96,22	13,66	8,65	66,60	59,48	69,67	62,70	61,44	52,27	0,50	0,29
Cd	1,54	1,46	1,21	0,73	14,56	12,48	12,89	11,13	11,87	9,69	0,00	0,00
Cu	0,81	1,36	53,74	57,79	6,57	9,96	5,97	9,12	14,00	20,23	67,06	67,81
Zn	0,59	0,96	31,40	32,82	12,28	18,09	11,48	17,05	12,69	17,81	32,45	31,90

FIGURA 5.14 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas micro-análises para o ensaio da cunha – metal de base: latão / prata pura.

As análises foram realizadas nos pontos A, B, C, D, E e F identificados na Fig.5.15, localizados afrente da região de folga máxima ideal.

Tendo como metais de base latão / prata-óxido de estanho, observou-se a formação das fases α_1 e β_x nos pontos identificados, através da comparação das porcentagens atômicas obtidas através das micro-análises por EDS, comparadas com as composições químicas retiradas da literatura e observadas na Tab. 5.14 acima.

Novamente observou-se a faixa escurecida rica em cádmio, zinco e cobre ao longo de toda a interface Ag-10%SnO₂ e o metal de adição.

O ponto de micro-análise D apresentou as composições considerando a presença do oxigênio (presente no SnO₂) e também o desconsiderando.

Fase	A		B		C		D				E		F	
	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.	%	% at.
	Interface AgSnO ₂ /Adição		α_1		β_x		Metal base AgSnO ₂		Metal base Ag		Interface Adição/Latão		Metal de base latão	
Ag	57,19	47,65	67,93	62,55	7,61	4,70	74,53	55,39	97,93	96,58	6,52	4,00	1,04	0,62
Cd	12,43	9,94	17,99	15,89	1,03	0,61	0,90	0,64	0,00	0,00	0,99	0,58	0,50	0,28
Cu	16,56	23,42	3,98	6,22	51,06	53,58	0,66	0,83	0,89	1,49	62,75	65,33	65,44	66,48
Zn	13,82	18,99	10,10	15,34	40,30	41,10	0,88	1,08	1,18	1,93	29,74	30,10	33,03	32,61
Sn							16,92	11,43						
O							6,11	30,63

FIGURA 5.15 – Fotografia por microscopia eletrônica de varredura de região do ensaio com as respectivas microanálises para o ensaio da cunha – metal de base: latão / prata-óxido de estanho.

5.2.4 Folga ideal

A fim de obterem-se os valores da folga ideal para brasagem para os diversos metais de base, mediu-se com a ajuda do microscópio eletrônico de varredura as espessuras médias das fases formadas junto às interfaces entre o metal base e o metal de adição.

Como se observa nas Fig. 5.13 e 5.15, ocorre a difusão de cádmio, zinco e cobre para a prata, conforme mostra a Tab. 5.10. Esta fase foi corroída pelo ataque químico, produzindo uma região mais escurecida, nomeada de e_{AgSnO_2} , conforme mostra a Fig.5.16.

FIGURA 5.16 – Microscopia do ensaio da cunha para Cu / Ag-10%SnO₂, identificando: e_{Cu} , $e_{Latão}$, e_{Ag} , e_{AgSnO_2} (MEV).

Esta região escurecida foi percebida ao longo de todo o comprimento, iniciando-se na folga igual à zero. À medida que o espaçamento da cunha aumentava, esta espessura crescia em função da existência de uma quantidade maior de metal de adição fundido em contato com o substrato durante o ensaio.

Nos metais de base em cobre (e_{Cu}), latão ($e_{Latão}$) e prata pura (e_{Ag}), folgas superiores a zero iniciaram o crescimento de soluções sólidas ou fases intermetálicas que são percebidas ao longo da interface de todo o corpo-de-prova. A espessura média destas fases também foram medidas. A Tab. 5.23 apresenta a relação das espessuras encontradas nos corpos de prova do ensaio da cunha.

TABELA 5.23 – Espessuras e_{Cu} , $e_{Latão}$, e_{Ag} , e_{AgSnO2} para cálculo da folga máxima ideal.

Medições aleatórias	e_{AgSnO2} (μm)	e_{Ag} (μm)	e_{Cu} (μm)	$e_{Latão}$ (μm)
1	19,20	9,21	10,40	2,24
2	20,70	7,87	2,36	1,28
3	15,40	10,50	3,07	1,28
4	13,00	8,70	4,61	2,05
5	15,40	9,21	5,28	2,56
6	24,60	9,60	7,20	2,30
7	15,40	9,21	11,90	1,79
8	18,40	8,64	3,54	3,58
9	23,00	10,40	3,07	2,81
10	20,00	9,72	3,84	3,84
11	16,10	9,60	5,76	2,30
12	12,30	9,60	6,24	1,54
13	17,30	9,21	10,70	2,24
14	23,30	7,10	3,54	1,60
15	15,40	9,60	3,07	1,54
16	17,10	11,90	4,22	2,30
17	20,00	9,98	5,76	2,81
18	23,80	10,10	6,72	2,56
Médias	18,36 ± 3,71	9,45 ± 1,04	5,63 ± 2,84	2,26 ± 0,71

O cálculo das folgas máximas (μm) pode ser realizado somando as espessuras dos respectivos metais de base de interesse, através da Eq.28 e conforme ilustra a Fig.5.17.

$$Folga_{Máxima} = espessura_1 + espessura_2 \quad (28)$$

FIGURA 5.17 – Esquema ilustrativo da obtenção da folga máxima ideal.

A Tab.5.24 apresenta os resultados das folgas máximas para os substratos em estudo.

TABELA 5.24 – Espessuras e_{Cu} , e_{Latao} , e_{Ag} , e_{AgSnO2} para cálculo da folga máxima ideal.

	e_{AgSnO2} (μm)	e_{Ag} (μm)	e_{Cu} (μm)	e_{Latao} (μm)	Folga Máxima (μm)
Cu / Ag	--	9,45	5,63	--	15,08
Cu / AgSnO2	--	—	5,63	--	5,63
Latão / Ag	--	9,45	--	2,26	11,71
Latão / AgSnO2	--	--	--	2,26	2,26

Para os pares em cobre, latão e prata pura, as espessuras das camadas medidas foram somadas, de forma que utilizando esta folga ideal encontrada, as soluções sólidas se tocariam evitando a formação da fase eutética contínua, em função do distanciamento excessivo.

Já para os pares que utilizavam como um dos metais de base o Ag-10%SnO₂, as alturas das soluções sólidas não foram visualizadas em função do fenômeno de erosão e da revelação da região escurecida. Supôs-se então, a folga ideal no instante em que as soluções sólidas tocassem diretamente a superfície do metal de base em Ag-10%SnO₂. Por esta razão, as folgas para Cu / Ag e Latão / Ag mostraram-se muito superiores aos pares constituídos por Ag-10%SnO₂.

6 CONCLUSÕES

Tendo em vista os equipamentos e materiais utilizados, pode-se concluir que:

1. Os ΔT dos ciclos térmicos das condições C_1 , C_2 e C_3 , aos quais as amostras da gota séssil foram submetidas foram considerados iguais com significância de 5%. Esta igualdade entre condições foi associada ao processo experimental empregado e também à rapidez do fenômeno do espalhamento. A mesma igualdade fora aceita, com o mesmo nível de significância, para os tempos t .
2. Os diâmetros finais (d_f) encontrados nas amostras da gota séssil foram considerados diferentes, com significância 5%. Esses diâmetros médios foram respectivamente: $8,48 \pm 0,75$ mm para os substratos em latão, $7,25 \pm 0,75$ mm para os substratos em cobre eletrolítico e $5,99 \pm 1,02$ mm para os substratos em prata pura. Os d_f para o latão foram maiores aos obtidos para o cobre e a prata pura, devido à presença do zinco, difundindo do metal de base para o metal de adição.
3. Os ângulos médios de contato teóricos (θ_t) para as três condições C_1 , C_2 e C_3 , dos substratos latão ($8,71^\circ \pm 0,61$), cobre ($9,87^\circ \pm 0,64$) e prata pura ($11,70^\circ \pm 1,63$) foram submetidas à mesma análise estatística e, com significância de 5%, tiveram sua igualdade rejeitada. Isso mostra que apesar de serem distintos, os ângulos de contato mostraram que a molhabilidade foi excelente.
4. Para os ensaios da gota séssil realizados com os substratos em Ag-10%SnO₂ não foi possível medir os respectivos d_f , e consequentemente, também θ_t , devido à presença de demolhamento.

5. Os corpos de prova em prata pura que receberam os ensaios da gota sssil apresentaram o fenmeno de eroso, devido diferena de solubilidade entre os elementos presentes na adio e no substrato.
6. Comparando estatisticamente os ciclos trmicos das condies C_1 , C_2 e C_3 , para todos os tipos de metais de base dos ensaios da cunha, as mdias entre si foram consideradas diferentes, com significncia de 5%. A mesma diferena foi evidenciada comparando simultaneamente todos os tempos t .
7. Comparando os ciclos trmicos dos ensaios da cunha em pares, aceitou-se com 5% de significncia, a igualdade entre as mdias de ΔT e t para os pares: Lato / Ag e Cu / Ag. A mesma igualdade foi evidenciada entre os pares: Lato / Ag-10%SnO₂ e Cu / Ag-10%SnO₂.
8. As folgas obtidas nos ensaios da cunha esto em conformidade com os valores publicados na literatura. Os valores de folgas mximas medidos foram:

Lato / Ag-10%SnO₂ : de zero a 2,26 μm ;

Cu / Ag-10%SnO₂ : de zero a 5,63 μm ;

Lato / Ag : de zero a 11,71 μm ;

Cu / Ag : de zero a 15,08 μm .
9. As fases presentes na adio dos ensaios da gota sssil e da cunha esto de acordo com os dados publicados na literatura para um diagrama de fases quaternrios Ag Cu Zn Cd e foram identificadas com base na micro-anlise por energia dispersiva, como: α , α_1 , β_x e β_y .
10. Com base no ensaio da gota sssil, os metais de base lato (CA-26800) e cobre eletroltico (CA-11000) apresentaram uma melhor brasabilidade que a prata pura e a Ag-10%SnO₂, que apresentaram, respectivamente, eroso e demolhamento.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Aprimorar os dispositivos e equipamentos para a realização deste tipo de experimento;
2. Investigar um metal de adição isento de cádmio que apresente uma brasabilidade comparável;
3. Investigar uma alternativa de metal de adição que minimize a erosão na prata pura.
4. Avaliar a molhabilidade do óxido de estanho (SnO_2) pelos metais de adição.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) “Diretivas: RoHS & WEEE”, Disponível em:
http://www.br.sgs.com/pt_br/ssc_palestra_diretiva_rohs.pdf, Acesso em:
09/02/2007.
- 2) MARTINS, P., “Meio ambiente em pauta”, Potência, ano 3, nº 25, pág. 18-32, Maio 2007.
- 3) HOYER, N. S., “Electrical contacts, in: Powder metallurgy”, ASM Handbook, vol. 7, ed. 9, pág. 630-634, 1984.
- 4) CHIAVERINI, V., ”Metalurgia do pó”, Associação brasileira de metalurgia e materiais, ed. 4, pág. 248-253, 2001.
- 5) ASM COMMITTEE ON ELECTRICAL CONTACT MATERIALS, “Electrical contact materials, in: Properties and selection of metals”, ASM Handbook, vol. 1, ed. 8, pág. 801-816, 1961.
- 6) ADDICKS, L., “Silver in industry”, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1940.
- 7) BUTTS, A.; COXE, C., “Silver economics, metallurgy, and use”, Robert E. Krieger publishing company, New York, 1975.
- 8) CARON, R. N.; STALEY, J. T., “Magnesium and magnesium alloys, in: Materials selection and design” ASM Handbook, vol. 20, pág. 406, 411, 412, 1997.
- 9) SCHOEPPF, T. J.; BEHRENS, V.; HONING, T.; KRAUS, A., “Development of silver zinc oxide for general-purpose relays”, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 25, nº 4, December 2002.

- 10) SCHATT, W.; WIETERS, K.P., “Powder metallurgy processing and materials”, EPMA European Powder Metallurgy Association, pág. 365-389, 1997.
- 11) RODRIGUES, A. C., “Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos”, Disponível em: http://www.rrr.cirp.usp.br/residuo_tec.html , Acesso em: 13/02/2007.
- 12) NILSSON, O.; HAUNER, F.; JEANNOT, D., “Replacement of AgCdO by AgSnO₂ in DC contactors”, Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contact and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, pág. 70-74, 2004.
- 13) WINGERT, P. C.; LEUNG, C. H., “The development of silver-based cadmium-free contact materials”, IEEE Transactions on Components, Hybrids, Manufacturing Technology, vol. 12, nº 1, March, 1989.
- 14) LAMBERT, C.; WEBER, D.; COUPEZ, S.; GUERLET, J. P., “A new doped silver tin oxide material with improved electrical behavior”, Proceedings of the 35th Meeting of the IEEE Holm Conference on Electrical Contact, pág. 69-78, September, 18-20, 1989.
- 15) GOETZEL, C. G., “Treatise on powder metallurgy – Applied and physical powder metallurgy”, Interscience Publishers, Inc., vol. 2, 1950.
- 16) MINGZHE, R.; QIPING, W., “Effects of additives on the AgSnO₂ contacts erosion behavior”, Proceedings of the 39th IEEE Holm Conference on Electrical Contact, pág. 33–36, September, 27-29, 1993.
- 17) FRANCISCO, H. A.; MYERS, M., “Optimization of silver tin oxide chemistry to enhance electrical performance in A.C. application”, Proceedings of the 44th

- IEEE Holm Conference on Electrical Contact, pág. 193-201, October, 26-28, 1998.
- 18) FRANCISCO, H. A.; MYERS, M., “The effect of various silver tin oxide materials on contact performance under motor load (A.C.)”, Proceedings of the 43rd IEEE Holm Conference on Electrical Contact, pág. 254–263, October, 20-22, 1997.
- 19) JEANNOT, D.; PINARD, J.; RAMONI, P.; JOST, E. M., “Physical and chemical properties of metal oxide additions to Ag-SnO₂ contact material and predictions of electrical performance”, IEEE Transactions on Components, Packing and Manufacturing Technologies, Part A, vol. 17, nº I, March, 1994.
- 20) JEANNOT, D.; PINARD, J.; RAMONI, P., “The effects of metal oxide additions or dopants on the electrical performance of AgSnO₂ contact materials”, Proceedings of the 39th IEEE Holm Conference on Electrical Contact, pág. 51–59, September, 27-29, 1993.
- 21) NETTO, L. F., “Resistividade, condutividade e coeficiente de temperatura”, Disponível em: http://www.feiradeciencias.com.br/sala12/12_26.asp , Acesso em: 02/03/2007.
- 22) SCHWARTZ, M., “Brazing for engineering technologist”, Chapman & Hall, London, 1995.
- 23) MACHADO, I. G., “Soldagem & técnicas conexas: processos”, editado pelo autor, pág. 329–355, 1996.
- 24) MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q., “Soldagem fundamentos e tecnologia”, Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005.
- 25) CARY, H. B., “Modern Welding Technology”, Prentice - Hall, Inc., 1979.

- 26) ASM COMMITTEE ON BRANZING OF STEEL, "Resistance brazing, in: Welding and brazing", ASM Handbook, vol. 6, ed. 8, pág. 643-654, 1971.
- 27) EUSTATHOPOULOS, N.; Nicholas, M.G.; Drevet, B., "Wettability at high temperature", Pergamon Materials Series, 1999.
- 28) YOUNG, T., "An essay on cohesion of fluids". Phil. Trans. Roy. Soc., vol. 95, London, 1805.
- 29) GOOD, J. R., "Contact angle, wettability and adhesion", K.L. Mittal, 1993.
- 30) PROBSTEN, R. F., "Physicochemical hydrodynamics: an introduction", Butterworth-Heinemann, Massachusetts, 1989.
- 31) LAURICELLA, C. M., "Proposta de modelamento do perfil da gota obtido no ensaio da gota sésil". Tese, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.
- 32) CARVALHO, C. Jr., "Estudo da brasabilidade de aço inoxidável duplex UNS S31803". Tese, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.
- 33) XIAOGANG, S., "Determinação da dinâmica de espalhamento e ângulo de contato de ligas para soldagem branda utilizadas na indústria eletrônica". Tese Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.
- 34) ADAMSON, A. R., "Physical Chemistry of Surfaces", ed. 5, John Wiley & Sons Inc., New York, 1990.
- 35) MARTORANO, K. M., "Molhamento e espalhamento de estanho e da liga 60%Sn-40%Pb sobre chapas de cobre e de ligas cobre-estanho". Tese Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2001.
- 36) EUSTATHOPOULOS, N.; Nicholas, M.G.; Drevet, B., "Wettability at high temperature", Pergamon Materials Series, 1999.

- 37) Santos, C.R.; Kuniyoshi, C.; Carvalho Jr, C; Brandi, S.D. – " Caracterização metalográfica de junta brasada de aço inoxidável duplex 2205". Soldagem e Inspeção, 12(10):79-88, 2007.
- 38) Petzow, G.; Aldinger, F. - "Nonvariante Gleichgewichte und Schmelzräume im System Silber-Kupfer-Zink-Kadmium". Zeitsch. Metallkunde, vol. 59, no. 2, pág. 145-152, 1968.
- 39) Petzow, G.; Aldinger, F. - "Das quaternäre Teilsystem Silber-Kupfer-Zink-Kadmium bei 20 Gew.-%Cd". Zeitsch. Metallkunde, vol. 59, no. 5, pág. 390-395, 1968.
- 40) Aldinger, F.; Petzow, G. - "Der Aufbau von Silber-Kupfer-Zink-Kadmium-Legierungen mit konstantem Kadmium-gehalt von 40% Gew.-%". Zeitsch. Metallkunde, vol. 59, no. 7, pág. 583-588, 1968.
- 41) LIDE, D. R., - "Handbook of chemistry and physics", CRC Press, ed. 73^a, pág 12/134 – 12/135, 1992 / 1993.
- 42) MURR. L. E., - "Interfacial phenomena in metals and alloys", Techbooks, pág. 101 a 106, 1975.
- 43) BAKER, H., "ASM handbook, alloy phase diagrams", ASM International vol.3, 1992.
- 44) Brandi, S. D., "Aspectos metalúrgicos da soldagem branda – Um processo de junção de mais de 6000 anos que continua desafiando a humanidade", 2º Simposio sobre tecnologia de soldagem Brasil – Alemanha, pág. 106 – 107.
- 45) "Tin oxide (SnO₂) stannic oxide – properties and applications", Disponível em: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2358> , Acesso em: 11/02/2007.

ANEXO 1

Curvas de *tempo x temperatura* para os ensaios da gota sssil:

Curvas de *tempo x temperatura* para os ensaios da gota sssil:

ANEXO 2

Curvas de *tempo x temperatura* para os ensaios da cunha:

Curvas de *tempo x temperatura* para os ensaios da cunha: