



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

PMT 596 – TRABALHO DE FORMATURA 2001

**Caracterização de pastas de
solda para soldagem branda
em eletrônica**

Autor: Elcio Michiharu Ishizuka
Orientador: Sérgio Duarte Brandi

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi e ao Prof. Dr. Douglas Gouvêa pelas orientações dadas.

À FAPESP pelo projeto de Iniciação Científica.

Às pessoas que colaboraram no meu trabalho (Manoel, Antonio, Lívio, Paulo, Rubens).

À minha família, minha namorada e, principalmente, aos meus amigos que me ajudaram e apoiaram nesses últimos cinco anos.

Índice

1. RESUMO.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 JUNÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS.....	7
2.2 BREVE HISTÓRICO DO SMT.....	8
2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SMT.....	9
2.4 PASTA DE SOLDA.....	10
2.5 REOLOGIA.....	11
2.5.1 VISCOSIDADE DA PASTA.....	13
2.6 PARTÍCULAS METÁLICAS.....	13
2.6.1 TAMANHO DAS PARTÍCULAS.....	14
2.6.2 FORMATO DAS PARTÍCULAS.....	15
2.6.3 PORCENTAGEM EM MASSA DE METAL.....	15
2.7 ETAPAS DA SOLDAGEM BRANDA (SMT).....	16
2.7.1 LIMPEZA DA SUPERFÍCIE.....	16
2.7.1.1 Tipos de fluxos.....	18
2.7.1.2 Fluxos resinosos.....	20
2.7.1.3 Fluxo à base de colofônia.....	20
2.7.1.4 Fluxo à base de resina sintética.....	22
2.7.1.5 Fluxos orgânicos.....	22
2.7.2 PREPARAÇÃO PARA SOLDAGEM.....	23
2.7.2.1 Soldas utilizadas na soldagem branda.....	24
2.7.2.2 Aplicação da pasta.....	26
2.7.2.2.1 “Screen Printing”.....	26
2.7.2.2.2 Estêncil.....	27
2.7.2.2.3 Aplicação por seringas.....	28
2.7.2.2.4 Transferência por pinos.....	29
2.7.3 SOLDAGEM.....	30
2.7.3.1 Região de pré-aquecimento.....	31
2.7.3.2 Região de encharque.....	31
2.7.3.3 Região de “Reflow”.....	32
2.7.3.4 Região de resfriamento.....	32
2.8 MOLHAMENTO.....	32

2.9	ENSAIO DE WILHELMY OU ENSAIO DA BALANÇA DE MOLHAMENTO	40
2.10	ENSAIO DA BALANÇA DE MICROMOLHAMENTO.....	46
2.11	MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DE DISPERSÕES	48
3.	<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	<u>50</u>
3.1	DETERMINAÇÃO DE PORCENTAGEM EM MASSA DE METAL NA PASTA.....	50
3.2	ENSAIO DE GRANULOMETRIA	51
3.3	ENSAIO DE MOLHAMENTO	52
3.4	ENSAIO DE ESPALHAMENTO.....	54
3.5	MEDIÇÕES DA VISCOSIDADE	55
3.6	OBSERVAÇÕES NO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	55
3.7	MEDIÇÃO DO POTENCIAL ZETA	56
3.8	ENSAIO DE MOLHAMENTO (BALANÇA DE WILHELMY)	57
4.	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	<u>59</u>
4.1	ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE PORCENTAGEM DE METAL	59
4.2	ENSAIO DE GRANULOMETRIA	61
4.3	ENSAIO DE MOLHAMENTO	65
4.4	ENSAIO DE ESPALHAMENTO.....	67
4.5	MEDIÇÃO DA VISCOSIDADE.....	72
4.6	OBSERVAÇÕES NO MEV	74
4.7	MEDIÇÃO DO POTENCIAL ZETA	76
4.8	ENSAIO DE MOLHAMENTO (BALANÇA DE WILHELMY)	77
5.	<u>CONCLUSÃO.....</u>	<u>79</u>
6.	<u>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>80</u>

Índice de figuras

Figura 1: Diferença entre placas impressas feitas pela técnica de SMT e placas feitas a partir de furos na placa de suporte.....	10
Figura 2: Escoamento em diferentes tipos de fluidos.....	12
Figura 3: Escoamento em fluidos tixotrópicos.....	12
Figura 4: O efeito do tamanho das partículas na viscosidade.....	14
Figura 5: Esquema de um metal com camada de moléculas de ar adsorvidas.....	17
Figura 6: Esquema de um metal com a camada de óxido e a camada de moléculas de ar adsorvidas.....	17
Figura 7: Camada de moléculas de ar adsorvidas deslocadas pelo fluxo líquido.....	18
Figura 8: Redução dos óxidos através da ação do fluxo.....	18
Figura 9: Estruturas de algumas resinas ácidas.....	21
Figura 10: Diagrama de fase estanho-chumbo.....	24
Figura 11: Esquema básico do método de "Screen Printing".....	26
Figura 12: Pasta aplicada sobre trilhos de cobre pelo método de "Screen Printing".....	27
Figura 13: Esquema simplificado do método de aplicação por seringas.....	28
Figura 14: Aspecto de uma placa com a pasta aplicada por dispersão por seringas.....	29
Figura 15: Esquema simplificado do método da transferência por pinos.....	29
Figura 16: Esquema de um forno e as regiões de pré-aquecimento, de soldagem e de resfriamento.....	31
Figura 17: Esquemática de um líquido molhando um substrato sólido, das energias de superfície e do ângulo de contato.....	34
Figura 18: Modelo simplificado explicando energia de superfície.....	35
Figura 19: Grau de molhamento em relação ao ângulo de contato.....	36
Figura 20: Junta com bom molhamento.....	38
Figura 21: Junta com mau molhamento.....	38
Figura 22: Demolhamento.....	39
Figura 23: Juntas frias.....	39
Figura 24 : Esquema do molhamento e espalhamento.....	40
Figura 25: Início do ensaio de Wilhelmy.....	41
Figura 26: Final do ensaio de Wilhelmy.....	42
Figura 27: Diagrama esquemático da balança de molhamento.....	43

Figura 28: Esquema de uma curva de molhamento de ensaio de Wilhelmy.....	44
Figura 29: Diminuição do ângulo de imersão em um glóbulo de metal líquido.....	47
Figura 30: Diferença nos resultados entre o ensaio de molhamento e ensaio de micromolhamento	47
Figura 31: Equipamento utilizado no ensaio de Wilhelmy	57
Figura 32: Adaptação do substrato para o ensaio de Wilhelmy	58
Figura 33: Gráfico de distribuição granulométrica para a pasta RM92 (medição 1).	61
Figura 34: Gráfico de distribuição granulométrica para a pasta RM92 (medição 2).	62
Figura 35: Gráfico de distribuição granulométrica para a pasta RP11 (medição 1).	63
Figura 36: Gráfico de distribuição granulométrica para a pasta RP11 (medição 2).	64
Figura 37: Junta de boa qualidade obtida no ensaio	66
Figura 38: Junta fria obtida no ensaio	66
Figura 39: Formação de "solder balls" no ensaio	67
Figura 40: Aspecto das deposições antes do ensaio.....	68
Figura 41: Aspecto das deposições depois do ensaio	68
Figura 42: Gráfico espalhamento x tempo de degradação para a pasta RM92.....	70
Figura 43: Gráfico espalhamento x tempo de degradação para a pasta RP11	70
Figura 44: Pasta estável.....	71
Figura 45: Pasta instável.....	72
Figura 46: Gráfico viscosidade x rotação para a pasta RM92	73
Figura 47: Gráfico viscosidade x rotação para a pasta RP11	74
Figura 48: Amostra padrão.....	75
Figura 49: Amostra da pasta RM92 degradada.....	75
Figura 50: Amostra da amostra RP11 degradada.....	76
Figura 51: Resultados do ensaio de Wilhelmy	77

Índice de tabelas

Tabela 1:Quadro comparativo entre os métodos de junção	8
Tabela 2: Porcentagem em massa de metal e viscosidade usada em pastas de solda a base de colofônia	16
Tabela 3: Classificação dos fluxos para soldagem branda de acordo com seus principais ingredientes	19
Tabela 4: Composição da liga.....	25
Tabela 5: Critério de inspeção de juntas.....	37
Tabela 6: Fração em massa do metal para a pasta RM92.....	59
Tabela 7: Fração em massa do metal para a pasta RP11	60
Tabela 8: Distribuição granulométrica das partículas para pasta RM92 (medição 1).....	61
Tabela 9: Distribuição granulométrica das partículas para pasta RM92 (medição 2).....	62
Tabela 10: Distribuição granulométrica das partículas para a pasta RP11 (medição 1)....	63
Tabela 11: Distribuição granulométrica das partículas para a pasta RP11 (medição 2)....	64
Tabela 12: Análise visual das soldas solidificadas após o ensaio	65
Tabela 13: Resultados experimentais para a pasta RM92.....	69
Tabela 14: Resultados experimentais para a pasta RP11.....	69

1. Resumo

A necessidade do estudo da pasta de ligas para soldagem branda e a sua degradação está relacionado à grande quantidade de soldas em componentes eletrônicos. Por exemplo, em um rádio de pilha comum o número de soldas ou junções é de aproximadamente 500. Já em um microcomputador, esse número salta para aproximadamente 100.000 junções [1]. A pasta possui elementos orgânicos que podem degradar com o tempo e com as condições de uso (umidade e temperatura). Com essa degradação é possível que, durante a soldagem, não haja o molhamento adequado dos terminais dos componentes das placas pela solda (pasta). Justamente por esses problemas e pela grande quantidade de soldas em uma placa, o estudo da pasta tem uma grande importância econômica.

A pasta foi, portanto, caracterizado através dos seguintes ensaios: determinação da fração de metal na pasta; granulometria; ensaio de molhamento; ensaio de espalhamento; medição da viscosidade; observações das partículas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV); medição do Potencial Zeta; ensaio de molhamento na balança de Wilhelmy.

Através destes ensaios foi possível concluir que degradação da pasta diminui a soldabilidade, aumenta o espalhamento e a viscosidade da pasta e que ocorre floculação das partículas metálicas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Junção de materiais metálicos

O processo de unir duas peças metálicas fazendo com que haja uma continuidade de materiais entre as peças é conhecido como junção.

A junção pode ser dividida em três grupos de acordo com o método, os materiais e as temperaturas envolvidas:

- Soldagem branda;
- Brasagem;
- Soldagem.

A soldagem branda é um método de junção utilizando-se a solda que é um metal de preenchimento, que deve ter temperatura de fusão inferior a 315°C [2]. Na soldagem branda, ocorre somente a fusão do metal de enchimento e a junta é preenchida por capilaridade.

A brasagem é análoga à soldagem branda, ou seja, somente o metal de preenchimento funde, mas este funde a uma temperatura acima de 427°C.

Já na soldagem, ocorre a fusão dos metais de base possibilitando o não uso dos metais de preenchimento.

As diferenças entre os três métodos que podem ser citados estão relacionadas com:

- Limite de temperatura da junta;
- Custo;
- Possibilidade de retrabalho.

O limite de temperatura da junta está relacionado à temperatura de fusão do metal de preenchimento ou do metal base.

A tabela 1 nos mostra as diferenças entre os métodos de junção de materiais metálicos.

Tabela 1:Quadro comparativo entre os métodos de junção [Adap. Ref. 1]

Fatores	Métodos de junção		
	<i>Soldagem branda</i>	<i>Brasagem</i>	<i>Soldagem</i>
<i>Limite de temperatura da junta (°C)</i>	38 – 427	427 – 871	Temperatura de fusão do metal base
<i>Efeito do aquecimento na peça</i>	Pequeno	Grande	Pequeno (para aquecimento rápido)
<i>Retrabalho e "rejunção" da junta</i>	Simples		Não é prático
<i>Tamanho da junta em relação ao condutor</i>	Pequeno		
<i>Custo do equipamento</i>	Baixo	Médio	Alto
<i>Facilidade de automação</i>	Fácil	Difícil	Difícil
<i>Estabilidade da junta em relação à vibração</i>	Estável		
<i>Estabilidade da junta em relação à oxidação</i>	Estável		

O método utilizado na indústria eletrônica é a soldagem branda pelo baixo custo dos equipamentos e pela possibilidade de automação. Além dessas vantagens, existe a possibilidade de retrabalho das juntas defeituosas.

A partir desse ponto a preocupação será a apresentação da soldagem branda utilizada em indústrias eletrônicas.

2.2 Breve histórico do SMT

A tecnologia do SMT (Surface Mount Technology) foi inicialmente aplicada nas indústrias eletrônicas aeroespaciais e militares, no meio da década de 1960 [1,3]. Atualmente, podemos encontrá-la em quaisquer tipos de indústrias eletrônicas, principalmente nas indústrias de computadores.

Com o surgimento e o desenvolvimento das placas de circuito impresso todos os tipos de placas são produzidos do mesmo modo: os componentes eletrônicos são fixados nas placas de suporte que possuem os circuitos condutores, e depois soldados [1].

No início, essas placas impressas possuíam furos onde eram inseridos os terminais condutores. Os componentes eram montados em uma das faces da placa de forma que os terminais condutores (bornes de ligação) passavam pelos furos e eram soldados nas trilhas condutoras na outra face da placa [4]. A soldagem geralmente é feita tendo-se a parte inferior da placa, já com o fluxo, entrando em contato com um banho de solda fundida.

Nos anos 80, o SMT desenvolveu-se rapidamente. Nessa técnica os componentes eletrônicos são montados sobre a placa evitando-se, assim, furos na placa de suporte. É necessária a aplicação de uma pasta de solda sobre o substrato em que se deseja soldar o componente eletrônico (por exemplo, uma placa de computador) para mantê-lo aderido sobre esse substrato. Essa pasta também é uma liga, que além de manter o componente aderido sobre a placa, possui a função de soldar o componente à placa.

A razão do desenvolvimento do SMT estava no fato de ela proporcionar a utilização das duas faces da placa (impossível nas placas impressas com furos) aumentando-se, dessa forma, o rendimento eletrônico por unidade de área.

Com o desenvolvimento de componentes voltados para o SMT (tais como capacitores, resistores, etc) e com o barateamento de custo dessa técnica, atualmente o SMT é bastante utilizado nas indústrias automobilísticas e de computadores.

2.3 Vantagens e desvantagens do SMT

As vantagens do SMT em relação às técnicas convencionais são [1]:

- a) Aumento de 50 a 70% na densidade de componentes nas placas;
- b) Redução grande no tamanho dos produtos finais;
- c) Possibilidade de se utilizar os dois lados da placa;
- d) Possibilidade de se utilizar vários tipos de componentes em uma só placa;
- e) Maior número de terminais por componentes;
- f) Maior velocidade e eficiência na transmissão de impulsos eletrônicos devido ao pequeno comprimento dos terminais;
- g) A produção de placas é mais rápida e eficiente;
- h) O espaço necessário para a estocagem do material é bem menor;
- i) O espaço necessário para a produção das placas é menor;
- j) A técnica é mais flexível para pequenas produções;

As desvantagens da técnica de SMT são:

- a) Pouco conhecimento na área;
- b) Nenhuma ou poucas normas para os componentes, processos, materiais e testes;
- c) Poucos profissionais com experiência nessa área;
- d) Alguns componentes eletrônicos não estão disponíveis;

e) Os custos iniciais são bastante altos.

2.4 Pasta de solda

A soldagem por SMT não seria possível sem o desenvolvimento das pastas de solda.

As pastas de solda foram desenvolvidas há mais de 20 anos voltadas principalmente para indústrias automobilísticas e aeroespaciais [3]. Com o decorrer dos anos, percebeu-se um vasto campo de aplicação nas indústrias eletrônicas. Juntamente com a técnica de soldagem por SMT, foi responsável pela produção de computadores cada vez mais menores, rápidos, melhores e baratos.

A Figura 1 mostra diferenças entre placas impressas feitas pela técnica de SMT e placas feitas a partir de furos na placa de suporte.

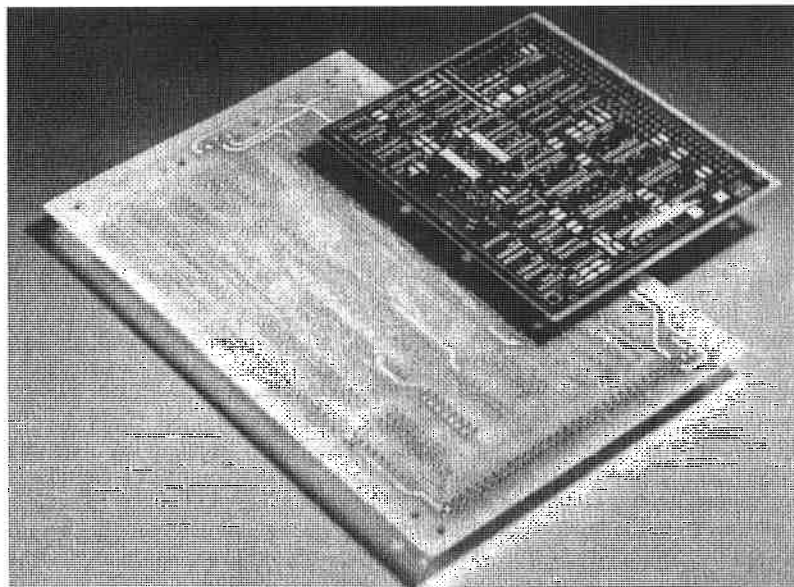


Figura 1: Diferença entre placas impressas feitas pela técnica de SMT e placas feitas a partir de furos na placa de suporte [1].

Segundo Wassinsk [1], a definição de pasta de solda é dada por suspensão de pó de partículas de solda em um fluxo na qual foram adicionadas agentes especiais. De acordo com Capillo [3], pasta de solda é um material homogêneo, formado por suspensão de pó de solda imerso em um meio tixotrópico, que nesse caso é o sistema de fluxo.

A partir dessas definições, podemos dizer que a pasta de solda é composta basicamente por duas partes:

1. Partículas metálicas;
2. Sistema de fluxo.

Cada parte é importante para o estudo das propriedades e do comportamento da pasta.

Antes de explicar como cada parte pode influenciar nas propriedades da pasta devemos introduzir alguns conceitos.

2.5 Reologia

É o estudo do comportamento de um fluido quando este está submetido a uma tensão de cisalhamento. Este estudo tem como base a viscosidade que é a razão entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento aplicadas no fluido [3]. A equação que relaciona essas grandezas é dada pela lei de Newton:

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento aplicada no fluido $\Rightarrow [\tau] = \text{dina/cm}$;

η = viscosidade $\Rightarrow [\eta] = \text{P(Poise)}$ ou cP(centiPoise) ;

$\frac{\partial v}{\partial y}$ = taxa de cisalhamento $\Rightarrow \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right] = \text{s}^{-1}$.

Os fluidos podem ser classificados como fluidos newtoniano, plásticos, pseudoplásticos e dilatantes [5].

Os fluidos newtonianos são aqueles cuja tensão de cisalhamento é proporcional a taxa de cisalhamento. Ou seja a viscosidade é constante para quaisquer tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento.

Já nos fluidos não newtonianos, não se observa essa característica. Nos pseudoplásticos, a viscosidade decresce não linearmente com o aumento da taxa de cisalhamento. Nos dilatantes a viscosidade aumenta não linearmente com o aumento da taxa de cisalhamento. Os plásticos são materiais intermediários entre um sólido e um fluido [5]. Quando eles são submetidos a uma tensão menor que um certo valor

característico, o material não escoar, ou seja, o material se comporta como um sólido. Acima desse valor característico, ele se comporta como um fluido newtoniano.

A Figura 2 mostra como cada fluido se comporta.

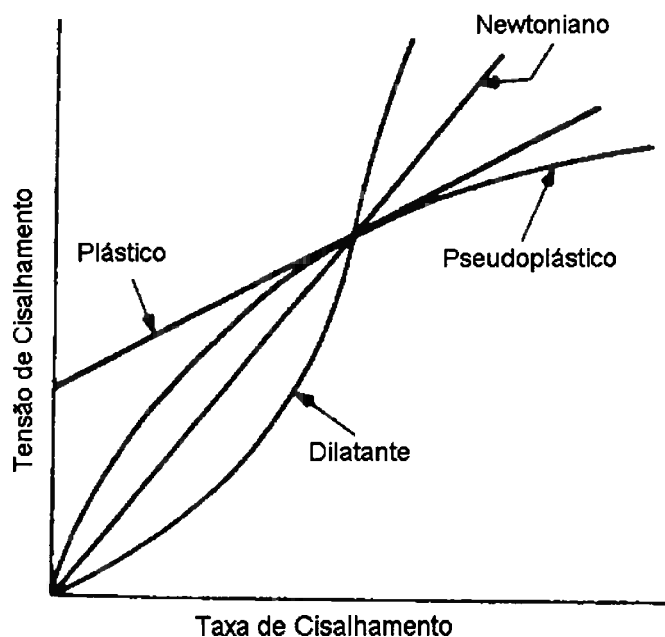


Figura 2: Escoamento em diferentes tipos de fluidos [3].

Além desses quatro tipos de materiais ainda se encontram os fluidos ditos tixotrópicos ou reopéticos. Sob condições isotérmicas e com taxa de cisalhamento constante, a viscosidade do primeiro diminui com o tempo e a do segundo aumenta com o tempo.

A Figura 3 mostra a curva de escoamento em um fluido tixotrópico.

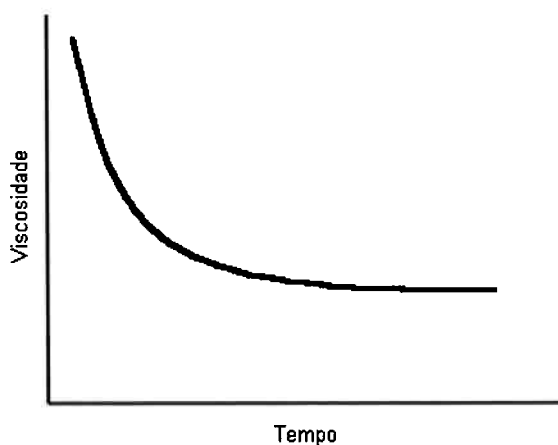


Figura 3: Escoamento em fluidos tixotrópicos [3].

Segundo Capillo [3], a pasta está na categoria dos tixotrópicos. Há uma grande semelhança entre os pseudoplásticos e os tixotrópicos. A diferença entre os dois materiais será discutida a seguir.

Tanto os pseudoplásticos como os tixotrópicos têm as suas viscosidades diminuídas quando se aumenta a taxa de cisalhamento. Mas os tixotrópicos necessitam de um tempo finito para que eles voltem a viscosidade inicial.

Uma das conseqüências dessa propriedade é que há a formação de uma curva de histerese quando temos um gráfico taxa de cisalhamento versus tensão de cisalhamento.

2.5.1 Viscosidade da pasta

Os fatores que mais influenciam a viscosidade da pasta são, a porcentagem de metal na pasta, o tamanho das partículas, o formato das partículas e a temperatura. Geralmente, a viscosidade da pasta está na faixa de 200000 a 800000cP [3]. A viscosidade é bastante importante durante a aplicação da pasta pois, quanto maior a viscosidade, maior será a dificuldade de se aplicar a pasta sobre a placa.

A viscosidade pode ser medida em um viscosímetro calculando-se o torque necessário para girar um rotor dentro da amostra.

Quando se faz um ensaio para a medição da viscosidade, deve-se, necessariamente, definir qual as condições de ensaio. Os principais dados que não podem faltar são: o tipo de viscosímetro, o modelo do viscosímetro, o tipo de spindle, o número de rotações por unidade de tempo do spindle e a temperatura na qual foi realizada a experiência.

2.6 Partículas metálicas

O conjunto formado pelas partículas metálicas é a parte mais importante das pastas de solda. É ele quem determina as propriedades da pasta. As características que devem ser observadas nas partículas são:

1. Tamanho;
2. Formato;
3. Porcentagem em massa.

Todas essas características, como foi descrito anteriormente, influenciam nas propriedades reológicas da pasta, principalmente na viscosidade.

2.6.1 Tamanho das partículas

O tamanho das partículas é determinado pelo tamanho das malhas da peneira. Os tamanhos das malhas mais comuns são 325, 200 e 100 mesh (número de aberturas por polegada quadrada) que correspondem a aberturas de 45, 75 e 150 μm respectivamente [1].

O tamanho das partículas é bastante importante, pois ele define, entre vários outros fatores, a viscosidade da pasta de solda. A Figura 4 mostra como o tamanho das partículas pode influenciar na viscosidade do material.

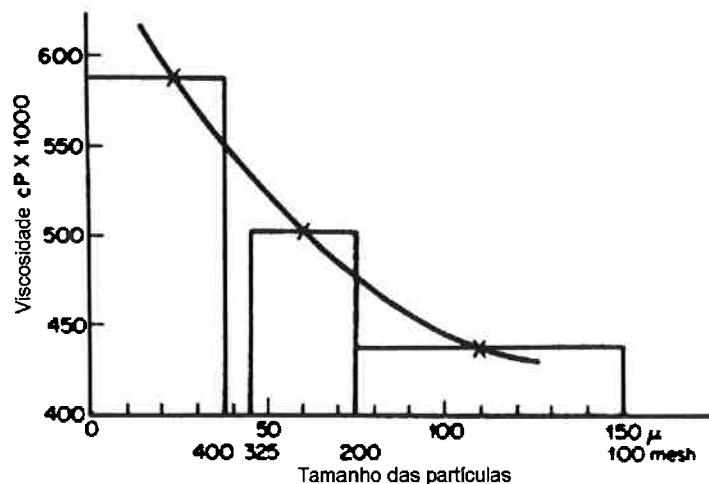


Figura 4: O efeito do tamanho das partículas na viscosidade [1].

Pode-se observar que quanto menor o tamanho das partículas maior será a viscosidade. Isso ocorre, pois quanto menor o tamanho das partículas, maior é a superfície de contato entre as partículas.

As partículas menores estão bastante propensas a apresentarem mais óxidos por grama de pasta [1]. Isso ocorre justamente pela maior área superficial. Como os óxidos devem ser removidos antes de serem soldados, a remoção dos óxidos será mais demorada e por isso a soldagem será mais demorada. Por esse motivo, é possível que o fluxo não seja suficiente para que haja boa limpeza da parte a ser soldada.

2.6.2 Formato das partículas

O formato das partículas metálicas da pasta depende do processo de fabricação. Pode-se ter formatos totalmente irregulares ou formatos perfeitamente esféricos. As partículas irregulares são geralmente as que foram pulverizadas em um jato de ar e as partículas esféricas são obtidas quando pulverizadas dentro de um meio líquido [3].

O formato das partículas é um parâmetro bastante importante nas propriedades reológicas.

O formato mais utilizado nas pastas de solda comercial é as esféricas. Ela é bastante utilizada, pois ela possui a menor área superficial por volume. Isso reduz bastante a oxidação superficial das partículas. Além disso, o formato esferoidal dá uma reprodutibilidade maior em termos de propriedades reológicas [3] (bastante importante na aplicação da pasta sobre um substrato).

Juntamente com o tamanho das partículas, o formato determina a viscosidade da pasta. Partículas menores e com formato esférico possuem viscosidade menor. Para que a viscosidade não seja excessivamente baixa, deve-se misturar à pasta uma fração de partículas com formato não-esférico.

2.6.3 Porcentagem em massa de metal

A porcentagem em massa de metal na pasta é bastante importante para as propriedades reológicas da pasta.

O valor da porcentagem em massa de metal nas pastas comerciais está numa faixa de valor entre 75 e 90%.

Como o modo de aplicação da pasta depende da viscosidade, a porcentagem de metal é quem determina qual o tipo de técnica deve ser utilizado para aplicar a pasta sobre a placa impressa.

A tabela 2 nos mostra a relação entre a porcentagem em massa de metal, a viscosidade e a técnica de aplicação da pasta sobre a placa. A pasta analisada nesse caso foi a pasta à base de colofônia (rosin-based solder paste) e a viscosidade foi medida nas seguintes condições: [equipamento: Brookfield, modelo: RVF, rotação: 5rpm, spindle: 7, temperatura: 24°C] [3].

Tabela 2: Porcentagem em massa de metal e viscosidade usada em pastas de solda a base de colofônia [2].

Técnica de aplicação da pasta	Viscosidade (cP)	Porcentagem em massa de metal
Stencil Printing	555000-750000	90
Screen Printing	450000-550000	90
Screen Printing	555000-675000	88
Seringa (agulha com diâmetro pequeno)	400000-600000	85
Seringa (agulha com diâmetro grande)	350000-450000	80

Pode-se observar, claramente, que quanto maior a porcentagem em massa de metal maior será a viscosidade da pasta de solda.

2.7 Etapas da soldagem branda (SMT)

A soldagem branda possui, basicamente, as seguintes etapas que devem ser seguidas, rigorosamente, para a obtenção de juntas admissíveis:

- Limpeza da superfície a ser soldada (através dos fluxos);
- Preparação para soldagem (métodos em SMT);
- Soldagem;
- Remoção dos resíduos provenientes do fluxo (se necessário).

Nos próximos itens serão discutidos os tópicos apresentados acima.

2.7.1 Limpeza da superfície

Quando uma superfície metálica fica em contato com o ar ocorre adsorção das moléculas que constituem o ar (O_2 , N_2 , CO_2). O restante fica ao redor em constante movimento [2]. O oxigênio adsorvido reage com a maioria dos metais e forma uma camada de óxido que prejudica bastante a soldagem.

Essa camada de óxido, por sua vez, adsorve outras moléculas do ar formando mais uma camada que impede a continuidade metálica na soldagem.

Antes de realizar a junção deve-se, primeiramente, remover as duas camadas através da ação dos vários tipos de fluxo.

As Figuras 5 e 6 mostram o esquema de uma superfície de um metal que possui moléculas adsorvidas e outro esquema de um metal com a camada de óxido e a camada de moléculas de ar adsorvidas.

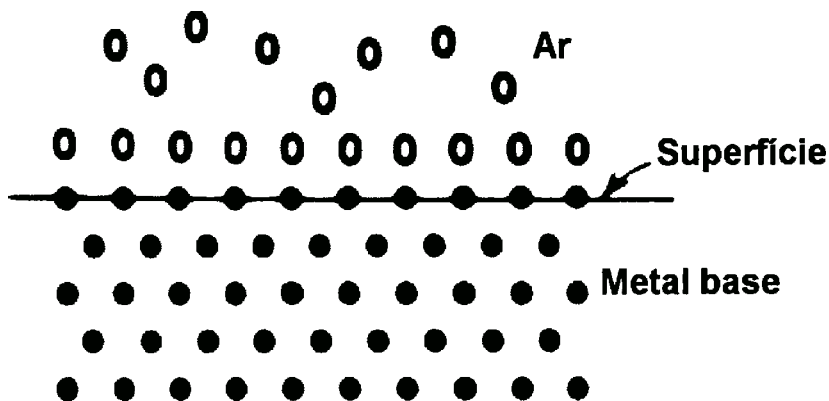


Figura 5: Esquema de um metal com camada de moléculas de ar adsorvidas[2].

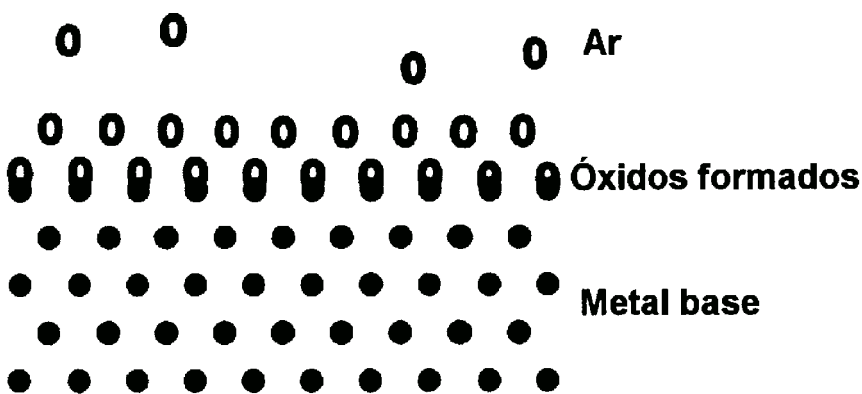


Figura 6: Esquema de um metal com a camada de óxido e a camada de moléculas de ar adsorvidas[2].

A limpeza da superfície metálica deve ser feita através da ação química dos fluxos. O fluxo primeiramente deslocará o filme de moléculas de ar adsorvidas e depois será o responsável pela retirada dos óxidos através de reações químicas de redução desses óxidos.

As etapas descritas acima podem ser visualizadas nas Figuras 7 e 8:

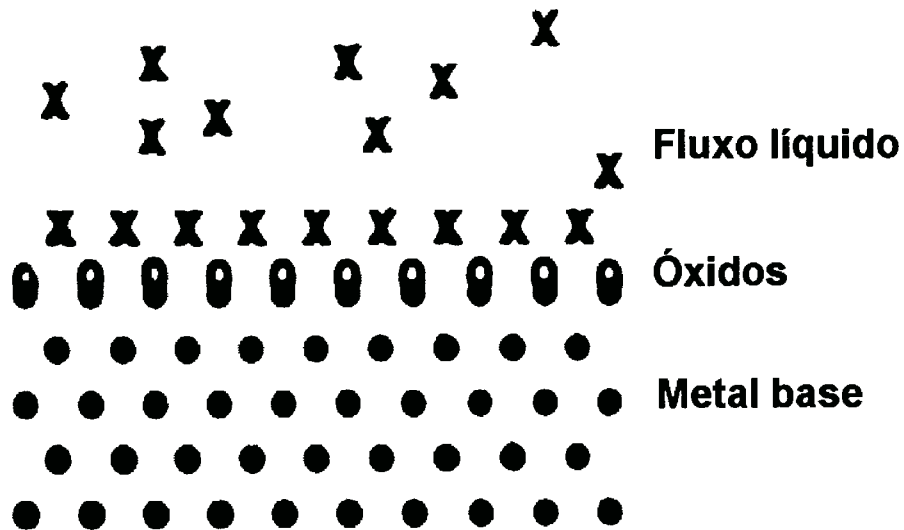


Figura 7: A camada de moléculas de ar adsorvidas deslocadas pelo fluxo líquido[1].

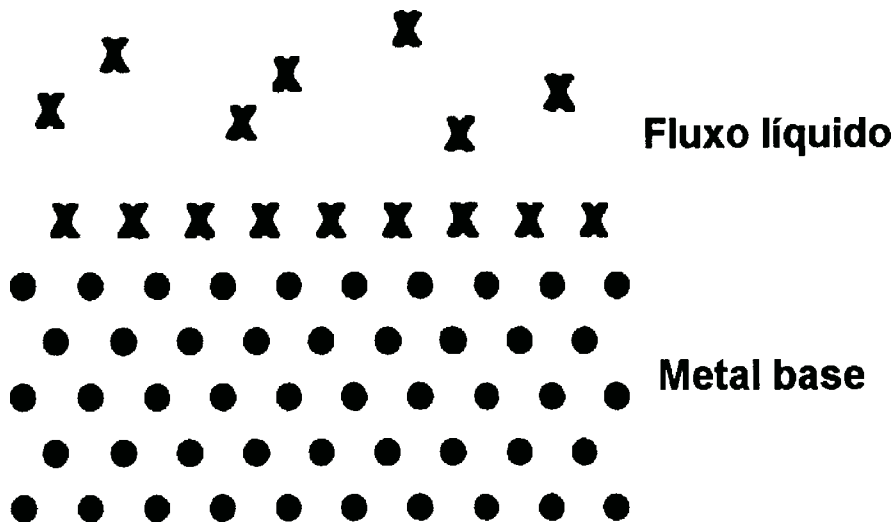


Figura 8: Redução dos óxidos através da ação do fluxo[1].

A seguir serão apresentados os vários tipos de fluxos que são utilizadas na soldagem branda.

2.7.1.1 Tipos de fluxos

Os sistemas de fluxo ou, simplesmente, fluxos correspondem à parte formada por substâncias ativas que possibilitam o molhamento da superfície do metal base pela solda.

Eles removem os filmes de óxidos da solda e da superfície formados antes e depois da soldagem. Assim, eles protegem a superfície metálica contra a reoxidação. Além disso, os fluxos ajudam a reduzir a tensão superficial da solda possibilitando o espalhamento e o aumento da fluidez da solda fundida [1-4]. Apesar de eles eliminarem os óxidos, eles não removem os contaminantes como, por exemplo, óleo, graxa, sais, portanto as superfícies necessitam de uma pré-limpeza.

Os fluxos utilizados em soldagem em eletrônica devem ter as seguintes características:

- Remover óxidos e penetrar os filmes;
- Proteger os metais da oxidação durante o aquecimento;
- Promover tensão superficial baixa na solda;
- Ser facilmente deslocado pela solda;
- Deixar resíduos não corrosivos;
- Ter resíduos facilmente removíveis, se necessário.

Os fluxos podem ser classificados em três tipos segundo os seus principais ingredientes como: Resinoso, Orgânico e Inorgânico.

A classificação é dada na tabela 3.

Tabela 3: Classificação dos fluxos para soldagem branda de acordo com seus principais ingredientes[4].

Tipo de fluxo	Base do fluxo	Ativação do fluxo	Forma do Fluxo	
1. Resinoso	1. colofônia (rosin)	1. ativadores não são adicionados 2. ativados com halogênios 3. ativados com não halogênios	A. líquido B. sólido C. pasta	
	2. sem colofônia (resina)			
2. Orgânico	1. solúvel em água			
	2. insolúvel em água			
3. Inorgânico	1. sais			1. com cloreto de amônio 2. sem cloreto de amônio
	2. ácidos			1. ácido fosfórico 2. outros ácidos
	3. alcalina	1. aminas e/ou amônia		

Os fluxos utilizados em SMT estão na forma de pasta. Os fluxos mais utilizados em SMT são os do tipo no-clean e os do tipo resinoso. A vantagem de se utilizar um fluxo no-clean está no fato de se economizar, na linha de produção, custos com mão-de-obra especializada e equipamentos. Além disso há economia de tempo. Leva-se em conta,

também, a questão ambiental, pois com a eliminação da etapa de remoção dos resíduos, não há liberação de solventes e água contaminada.

Nas pastas de solda os fluxos constituem a parte que combina com as partículas metálicas para formar uma massa homogênea. O fluxo é responsável pela tixotropia da pasta.

O fluxo utilizado em pastas de solda (utilizado em SMT) é composto, basicamente, por quatro componentes:

1. Colofônia ou resinas: adicionados para melhorar a propriedade de aplicação da pasta;
2. Solvente: solventes orgânicos (álcool isopropílico);
3. Ativadores: ácidos orgânicos, aminas, amidas;
4. Agentes tixotrópicos: ajusta a viscosidade para a aplicação da pasta. Ajuda a manter o pó de metal em suspensão

Às vezes adicionam-se agentes estabilizantes. Eles possuem a função de ajudar a reduzir a taxa de reações químicas à temperatura ambiente. Com isso, eles mantêm a qualidade da pasta.

2.7.1.2 Fluxos resinosos

São os mais utilizados nas pastas de solda. Eles são solúveis em solventes orgânicos como álcool isopropílico e álcool etílico.

Os fluxos resinosos são separados em dois grupos que são os fluxos à base de colofônia (natural) e os fluxos à base de resina sintética. A seguir serão apresentados esses dois grupos.

2.7.1.3 Fluxo à base de colofônia

A colofônia é um material natural extraído da oleoresina dos pinhos e refinado. Ela é disponível na forma de goma ou óleo e, às vezes, é modificado quimicamente podendo ser achada em várias colorações [1,3]. Essa coloração depende basicamente do grau de

pureza e de oxidação do material. A forma mais pura é designada pela ASTM D509-55 como white water (WW) e é o tipo mais brando de fluxo (colofônia não ativado).

A colofônia consiste em uma mistura de várias resinas isoméricas ácidas que possuem 3 anéis diferindo principalmente nas posições das duplas ligações e do grupo alquil ligado aos anéis. O principal componente é o ácido abiético com temperatura de fusão igual a 172°C [1,2,3].

A Figura 9 nos mostra as estruturas do ácido abiético e seus isômeros.

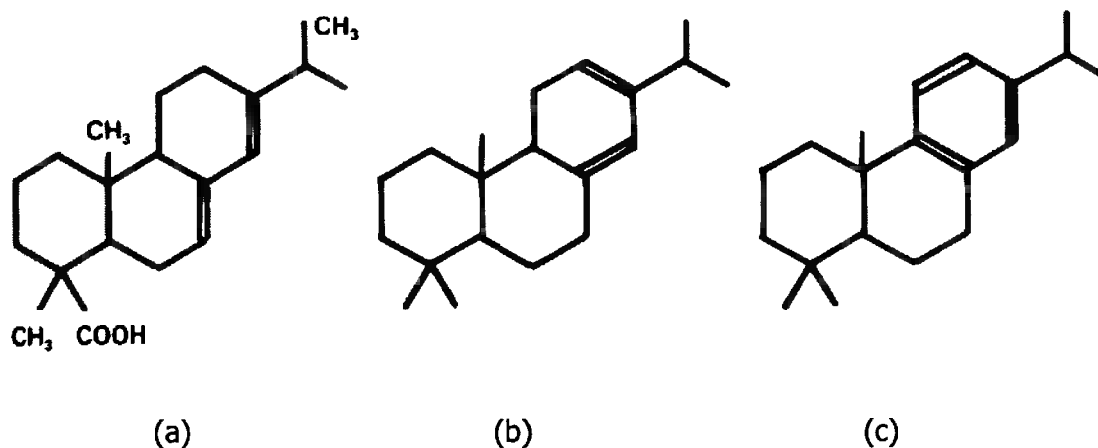


Figura 9: Estruturas de algumas resinas ácidas (a)ácido abiético (b)ácido levopimárico (c)ácido dehidro abiético [4].

A colofônia do tipo WW é muito brando para remover os óxidos da maioria dos metais, pois o ácido abiético possui somente um grupo -COOH em sua grande molécula [1]. Isso confere pouca molhabilidade da solda. Para aplicação nas indústrias, são adicionados ativadores tais como: amina alcalina, hidroaleto e compostos orgânicos halogenados.

Dependendo da quantidade desses ativadores temos 4 tipos de fluxo à base de colofônia [1,2,3]:

- R: colofônia não ativada (rosin, nonactivated)
- RMA: colofônia pouco ativada (rosin, mildly activated)
- RA: colofônia ativada (rosin, activated)
- RSA: colofônia superativada (rosin, superactivated)

Os tipos de fluxo que são utilizados em equipamentos eletrônicos de alta tecnologia são os R e RMA. Esses dois tipos de fluxos são não-corrosivos e o fluxo do tipo RMA é o mais usado na forma de pasta nas pastas de solda.

O fluxo do tipo RA é usado bastante nos produtos comerciais e é freqüentemente deixado nos componentes dos produtos como televisões, rádios e telefones.

O fluxo do tipo RSA é pouco utilizado. A sua aplicação se restringe basicamente em limpar metais difíceis de soldar. Não é utilizado em componentes eletrônicos porque são corrosivos e difíceis de remover após a solda.

2.7.1.4 Fluxo à base de resina sintética

O fluxo à base de resina sintética é bastante vantajoso porque ele é mais fácil de ser removido que o fluxo à base de colofônia. Enquanto que os resíduos do fluxo à base de colofônia ficam bastante rígidos com o resfriamento, os resíduos do fluxo à base de resina sintética são líquidos a temperatura ambiente. Além disso, a resina sintética, geralmente possui melhor qualidade e condições de armazenamento que o fluxo à base de colofônia.

Apesar dessa vantagem, as resinas sintéticas devem ser misturadas com uma pequena porcentagem de colofônia.

O fluxo à base de resina sintética também pode ser classificado em 4 grupos como no fluxo à base de colofônia:

- SR: resina sintética não-ativada
- SMAR: resina sintética pouco ativada
- SAR: resina sintética ativada
- SSAR: resina sintética superativada

2.7.1.5 Fluxos orgânicos

Os fluxos orgânicos não são muito utilizados em SMT pois eles são geralmente corrosivos e necessita-se de uma limpeza após a solda para remover os resíduos.

As principais características dos fluxos orgânicos são que eles deixam resíduos corrosivos e são bastante sensíveis à temperatura devido aos radicais orgânicos.

Os fluxos orgânicos podem ser subdivididos em três categorias [2]:

- Ácidos orgânicos;

- Haletos orgânicos;
- Aminas e amidas.

Os fluxos formados por ácidos orgânicos possuem média capacidade de remover óxidos. Eles são solúveis em água. Nesse grupo incluem-se os ácidos láctico, cítrico, oleico, esteárico, ftálico [1,2,3].

Os fluxos formados por haletos orgânicos possuem alta corrosividade comparados aos outros fluxos orgânicos. Já os fluxos com aminas e amidas são formados por uréia, trietanoamina, etilenodiamina. A ação do fluxo é relativamente baixa e são utilizados em soldagem de prata e zinco.

As desvantagens dos fluxos orgânicos em comparação com outros tipos de fluxo são [1]:

- A ação do fluxo é bastante baixa e não pode ser usado em metais como ouro, prata, cobre e estanho;
- Os ácidos orgânicos são decompostos facilmente em temperatura ambiente e formam compostos que não são solúveis em água;
- Para compensar a fraca ação do fluxo adiciona-se alta concentração de ácidos que aumentam a corrosividade do fluxo.

2.7.2 Preparação para soldagem

A solda é um dos componentes mais importantes que deve ser levado em conta para que haja uma junta de boas propriedades.

Na técnica SMT a solda se apresenta na forma de pasta de solda e a obtenção de uma junta de boa qualidade depende da liga utilizada e também do método de aplicação da pasta. Além disso, as condições da pasta e da superfície do metal base (já discutido no item anterior) influem bastante na qualidade da junta.

Nos próximos tópicos serão discutidos os itens citados acima.

2.7.2.1 Soldas utilizadas na soldagem branda

As ligas utilizadas na soldagem branda devem ter as seguintes propriedades:

- Devem fundir a temperaturas relativamente baixas entre (180°C e 300°C);
- Um dos componentes da liga deve ter boa afinidade com os metais de base;
- A liga deve formar compostos intermetálicos que não são frágeis;
- Os óxidos da liga devem ter propriedades que não comprometam as propriedades da junta, uma vez que a solda solidificada sofre oxidação.
- Devem possuir resistência a corrosão, resistência a fadiga e ductilidade

A liga que é mais utilizada na soldagem branda é a liga estanho-chumbo. Essa liga satisfaz todas as condições citadas acima. Na realidade existe grande variedade de soldas baseadas em chumbo e estanho mudando somente a composição da liga. Em soldagem em eletrônica, inclusive na técnica de SMT, a liga geralmente possui a composição de 60 a 62% em massa de estanho e 38 a 40% de chumbo[1].

A composição da liga utilizada pode ser explicada, pois essa faixa de composição está próxima da composição eutética que é a liga com menor ponto de fusão e a solidificação é mais rápida evitando formação de juntas frias.

A Figura 10 mostra o diagrama de fase da liga estanho-chumbo.

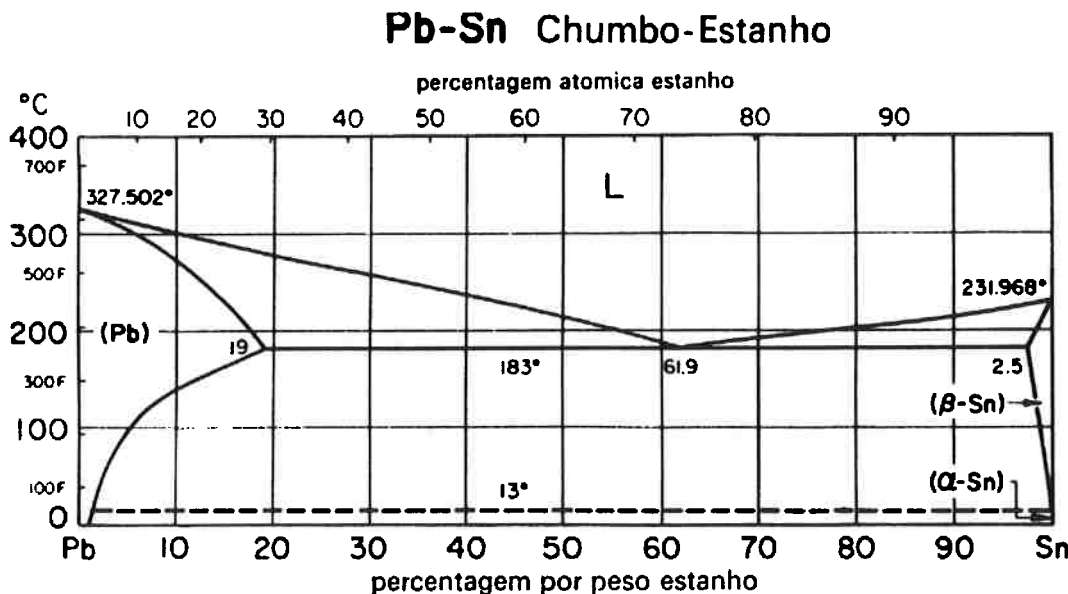


Figura 10: Diagrama de fase estanho-chumbo[4].

Observa-se na Figura 10 que a composição eutética é a liga 61,9% em massa de estanho e possui a temperatura de fusão (ou temperatura eutética) igual a 183°C.

A norma ASTM B-32 fornece os códigos das ligas, a composição delas e a temperatura da *solidus* e da *liquidus*. Têm-se os dados de algumas ligas na tabela 4:

Tabela 4: Composição da liga [Adap. ASTM B-32]

Códigos	Composição (%massa)									Temperaturas(°C)	
	Sn	Pb	Ag	Cu	Cd	Al	Bi	As	Fe	<i>Solidus</i>	<i>Liquidus</i>
Sn70	69,5-71,5	Resto	0,015	0,08	0,001	0,005	0,25	0,03	0,02	183	193
Sn63	62,5-63,5	Resto	0,015	0,08	0,001	0,005	0,25	0,03	0,02	183	183
Sn62	61,5-62,5	Resto	1,75-2,25	0,08	0,001	0,005	0,25	0,03	0,02	179	189
Sn60	59,5-61,5	Resto	0,015	0,08	0,001	0,005	0,25	0,03	0,02	183	190

Deve-se notar na tabela 4 que se deve controlar a quantidade de impurezas na liga. Esses outros metais são impurezas que comprometem bastante a soldabilidade, ou seja, comprometem o molhamento e espalhamento da solda.

Em SMT, as pastas de solda utilizadas possuem baixa tolerância na quantidade de impurezas que estão na liga [6].

As impurezas mais comuns que são encontrados nas ligas de pastas de soldas são [1,2,6]:

- Alumínio, Zinco, Cádmio → sofrem oxidação facilmente e seu óxido é bastante difícil de ser reduzido pelo fluxo. Como resultado eles produzem juntas que não aderem bem ao metal base e que são bastante frágeis.
- Antimônio → esse metal em pequenas quantidades (menor que 0,3%) aparentemente melhora a molhabilidade da solda, mas com o aumento gradativo na quantidade desse material a molhabilidade fica prejudicada. Uma pequena quantidade desse metal é necessária para que ele forme um composto intermetálico com alumínio, inibindo o seu efeito deletério.
- Arsênio → causa demolhamento;
- Enxofre → forma compostos intermetálicos com o estanho (SnS) e com o chumbo (PbS) que ficam na superfície da solda tornando a superfície rugosa. Pode causar também demolhamento;

2.7.2.2 Aplicação da pasta

Em SMT, como foi mencionado anteriormente, a solda se apresenta na forma de pasta. Existem vários métodos de aplicação da pasta cuja aplicação depende basicamente das condições da pasta. Os métodos mais comuns são [1, 3]:

- "Screen Printing";
- Estêncil;
- Aplicação por seringas;

Os métodos de aplicação da pasta serão descritos a seguir.

2.7.2.2.1 "Screen Printing"

É o método mais utilizado em SMT para aplicação da pasta sobre as placas [1,3].

Nessa técnica, a pasta é colocada sobre uma tela com uma determinada abertura e uma espécie de espátula espalha a pasta sobre a tela. Além disso, ela pressiona as partículas da pasta entre as aberturas fazendo com que elas se depositem sobre os trilhos de cobre formando uma camada de pasta sobre a qual é posta os componentes eletrônicos para soldagem. O material que é utilizado na fabricação das telas é o aço inox por causa da precisão e da resistência.

A granulometria das partículas da pasta é um fator que determina o tamanho das aberturas da tela. O tamanho do pó deve ser de aproximadamente 25 a 30% da abertura da tela e as partículas alongadas devem ser evitadas para que não obstruam as aberturas [1,7].

A Figura 11 mostra o esquema básico do método de aplicação.

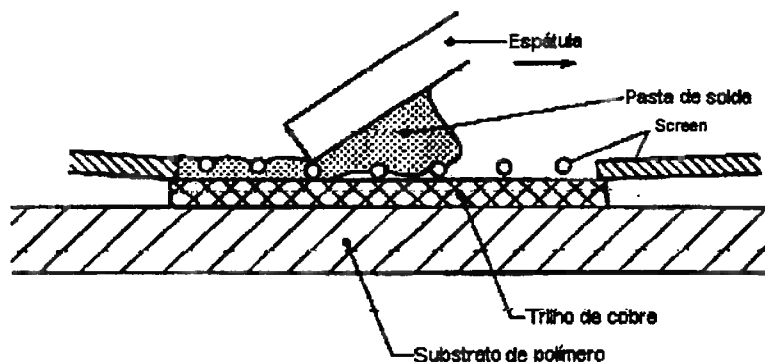


Figura 11: Esquema básico do método de "Screen Printing" [1].

A Figura 12 mostra o aspecto da pasta quando ela é aplicada por esse método.

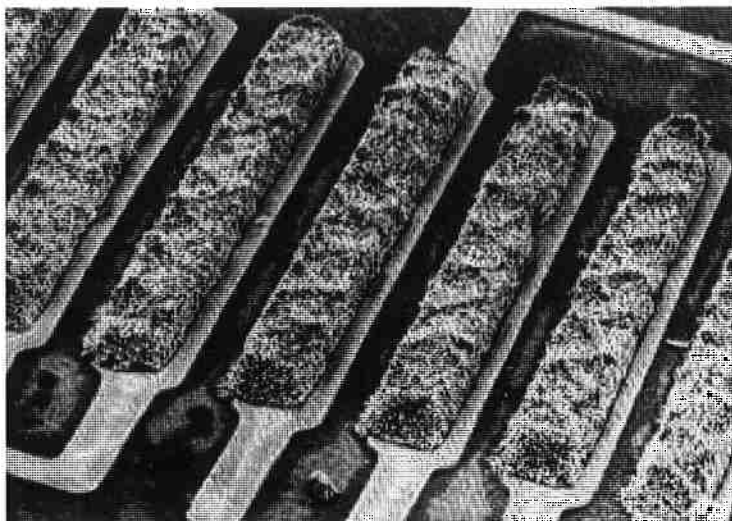


Figura 12: Pasta aplicada sobre trilhos de cobre pelo método de "Screen Printing" [1].

Essa técnica geralmente é utilizada quando a pasta possui viscosidade de 200 a 400 Kps (a 20rpm utilizando um viscosímetro Brookfield RVT com "spindle" TF), partículas com granulometria de 45 a 75 μm e fração em massa de metal igual a 85% [1,7].

2.7.2.2.2 Estêncil

O método de aplicação da pasta por Estêncil ou "Stencil Printing" é semelhante ao método de "Screen Printing" descrito anteriormente.

Nesse método, a pasta é posta sobre um estêncil que é uma folha fina de cobre ou aço inox vazada e depois, como no "Screen Printing", a pasta é espalhada sobre o estêncil. A espessura da camada da pasta sobre o substrato é determinada pela espessura do estêncil [1].

A vantagem dessa técnica comparada ao "Screen Printing" é que esta pode ser utilizada em pequenas áreas e, ainda, pode-se controlar a quantidade de material que se deposita sobre o substrato sólido mudando-se somente a espessura do estêncil. Além disso, a abertura não fica obstruída pela presença de partículas alongadas no método de "Stencil Printing".

Nessa técnica, a viscosidade da pasta deve ser de 400 a 800 Pa·s e a fração em massa de metal na pasta deve ser de 85 a 90% [1].

A viscosidade da pasta deve ser maior nessa técnica, pois se o material fluir muito sobre o estêncil ele pode contaminar partes indesejáveis da placa ou ligar dois terminais durante a soldagem causando um curto circuito.

2.7.2.2.3 Aplicação por seringas

Este método consiste na aplicação da pasta sobre os trilhos de cobre através de seringas e, geralmente é feita ponto por ponto. A pasta é colocada em seringas e a quantidade de pasta depositada sobre o metal base é controlada através da pressão aplicada no êmbolo.

O formato da pasta depositada depende basicamente da pressão, tempo de pressão, diâmetro da agulha, posição da agulha e também das propriedades físicas da pasta como a granulometria do pó e a viscosidade [1, 7].

O método de aplicação é utilizado para pastas com viscosidade de 70 a 140Kps (a 20 rpm utilizando um viscosímetro Brookfield RVT com "spindle" TF) e com fração em massa de metal igual a 80% [1, 7]. Além disso, deve-se tomar cuidado com o formato das partículas para que não haja obstrução da agulha da seringa.

A Figura 13 é um esquema simplificado do método.

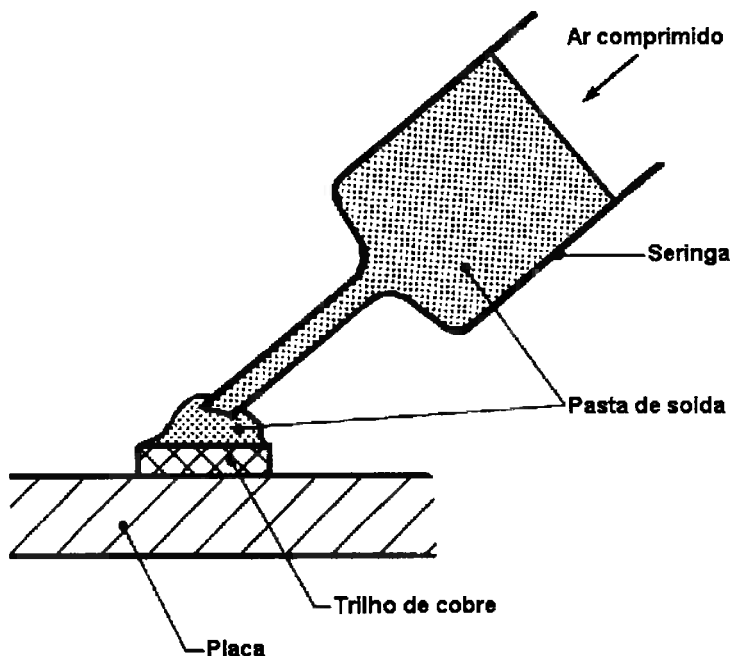


Figura 13: Esquema simplificado do método de aplicação por seringas [1].

A Figura 14 mostra o aspecto de uma placa com a pasta aplicada pelo método descrito neste item.

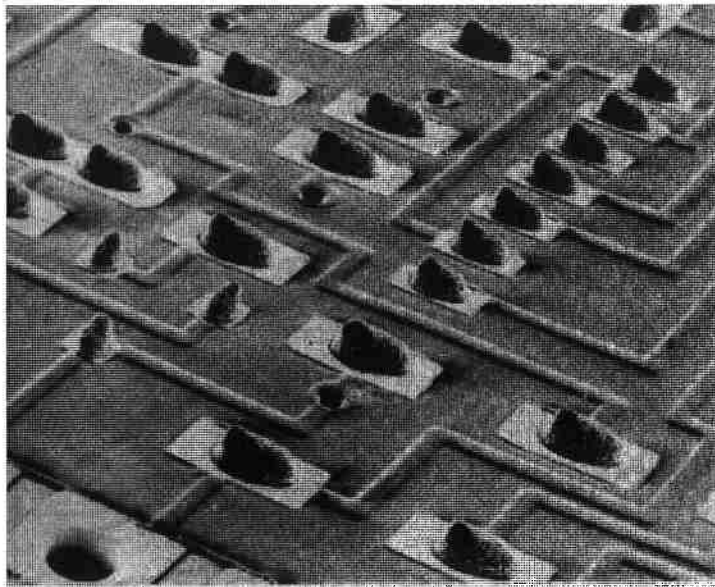


Figura 14: Aspecto de uma placa com a pasta aplicada pelo método de dispersão por seringas [1].

2.7.2.2.4 Transferência por pinos

Nesta técnica a pasta é espalhada formando uma fina camada homogênea. Depois disso, a pasta é aplicada nas placas através de um pino que é mergulhado na fina camada de pasta e a pasta que fica aderido no pino é aplicada sobre a placa [1].

A Figura 15 mostra o esquema da técnica de aplicação.

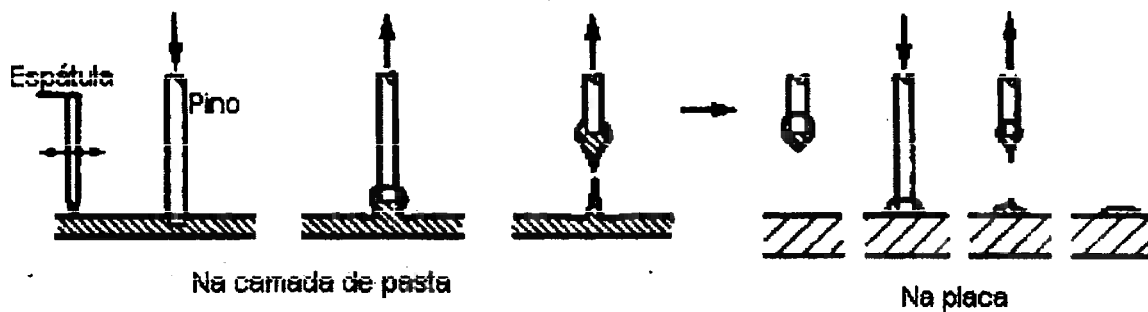


Figura 15: Esquema simplificado do método da transferência por pinos [1].

Nessa técnica deve-se tomar cuidado com as propriedades da pasta, com o formato e as dimensões do pino, com a profundidade de imersão e com os tempos de imersão do pino e de aplicação da pasta, pois esses fatores determinam a quantidade de pasta que é depositada sobre a placa.

Geralmente a técnica é utilizada para pastas de solda com viscosidade entre 70 e 130 Pa.s e com partículas esféricas ou em formato de pêras com granulometria entre 10 e 45 μm .

2.7.3 Soldagem

Depois da introdução da solda, vem a soldagem propriamente dita. Nesse processo a solda deve se fundir para que forme compostos intermetálicos com o metal base. Com a formação desses compostos ocorre a continuidade metálica entre a solda e o metal base, possibilitando, assim, a condução elétrica em placas.

A fusão da solda pode ser feita de várias formas, ou seja, existem vários métodos de soldagem. Em eletrônica a soldagem branda se dá por "reflow soldering", que é um tipo de soldagem em que uma junta já pronta é fundida novamente sem que haja uma nova aplicação da solda [1,2,7]. Esse tipo de soldagem se dá, geralmente, em fornos (soldagem por infravermelho) com atmosfera controlada.

Nessa técnica, as placas (já com a pasta aplicada) são colocadas em uma esteira que se desloca dentro de um forno que contém vários emissores de radiação infravermelha. A soldagem se dá, principalmente por convecção do ar quente que circula dentro do forno [1,8].

O forno é dividido, basicamente, em quatro regiões:

- Região de pré-aquecimento;
- Região de encharque;
- Região de "reflow";
- Região de resfriamento.

A Figura 16 mostra um esquema de um forno e as regiões de pré-aquecimento, de soldagem e de resfriamento.

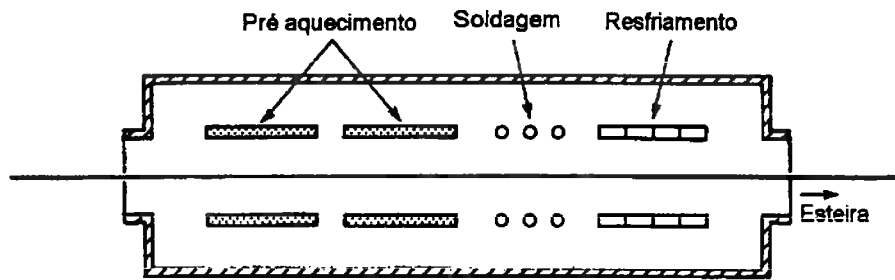


Figura 16: Esquema de um forno e as regiões de pré-aquecimento, de soldagem e de resfriamento [1].

2.7.3.1 Região de pré-aquecimento

A placa, com os componentes sobre a pasta aplicada, entra no forno e começa a ser aquecida a uma taxa que deve ser determinada pelos tipos de materiais que formam o sistema [7,8]. Dependendo do tipo de fluxo e dos ativadores a ele adicionado deve-se ter uma temperatura final entre 75 e 120°C.

Nessa região ocorre, principalmente, a evaporação dos solventes e a ativação do fluxo. A evaporação dos solventes aumenta a viscosidade da pasta e a ativação do fluxo contribui para a redução dos óxidos presentes.

2.7.3.2 Região de encharque

Antes de entrar no estágio de "reflow", onde a soldagem ocorre, deve-se ter uma região na qual a placa permanece aquecida a temperatura constante por um certo intervalo de tempo. Nessa etapa, diz-se que a placa está na região de encharque.

As placas, geralmente formadas por substratos de polímeros com trilhos de cobre, devem ter um tempo suficiente para haja transferência de calor evitando altos gradientes de temperatura sobre elas [8].

Nessa região, todo o solvente que restou da etapa anterior se evapora e o fluxo fica totalmente ativado eliminando os óxidos da superfície da trilha de cobre e da solda.

Da mesma maneira que o estágio anterior, a temperatura e o tempo em que a placa fica nessa região depende do tipo de fluxo. O fluxo do tipo RMA fica totalmente ativado quando se tem a temperatura entre 150 e 170°C e o tempo de "molho" deve ser menor que 1 minuto [7].

O tempo de encharque é o tempo em que a placa deve ficar nesse estágio para que haja a maximização da etapa. Passando esse tempo, o fluxo poderá se degradar e a solda oxidar.

2.7.3.3 Região de "Reflow"

É a região em que ocorre a soldagem propriamente dita.

A maioria das soldas utilizadas em SMT é a liga binária 63Sn-37Pb (composição eutética) que possuem temperatura de fusão igual a 183°C.

Recomenda-se que a temperatura de soldagem seja 15 a 30°C acima da temperatura de fusão da liga para que haja completa fusão e formação de uma boa junta [7].

O tempo em que a solda fica acima da temperatura de fusão deve ser controlado para que a formação da junta seja boa. Quanto maior o tempo em que a solda fica acima da temperatura de fusão, maior será a formação de intermetálicos.

A temperatura de soldagem é a maior do processo e que o tempo em que a solda fica acima da temperatura de fusão inclui uma fração de tempo em que ela gasta no resfriamento.

2.7.3.4 Região de resfriamento

Depois que ocorre a soldagem e a placa sai das regiões de aquecimento ocorre o resfriamento. O resfriamento pode ser feito por ventiladores, refrigeradores ou, simplesmente, por exposição à temperatura ambiente.

Como no caso do pré-aquecimento, deve-se controlar bem a taxa de resfriamento para que não haja um choque térmico.

2.8 Molhamento

Na soldagem branda, os parâmetros que definem se a junta está boa ou ruim são o molhamento (ângulo de contato) e o espalhamento. Esses estão relacionados com o

tipo de fluxo, a liga utilizada, a temperatura e o substrato metálico onde está sendo feita a junção.

Para a medida do ângulo de contato podem ser utilizados vários métodos, tais como Ensaio da gota séssil e Ensaio de Wilhelmy (balança de molhamento ou balança de micromolhamento). Esta última será utilizada neste trabalho e descrita com mais detalhe a seguir.

Serão apresentadas noções de molhamento e espalhamento para, posteriormente, serem introduzidos os detalhes do ensaio da balança de micromolhamento, que é uma adaptação do ensaio de Wilhelmy.

A soldagem branda depende basicamente dos fenômenos de molhamento do metal de adição sobre o metal base. A solidificação do metal de adição possibilita uma ligação física e química bastante forte. Com essas ligações, observa-se uma continuidade de material metálico entre o metal de preenchimento e o de base, característica que deve ser obtido para uma boa junção.

Essa continuidade metálica, porém, não é fácil de ser obtida. Normalmente existe um filme de impurezas na superfície do metal de base e também no metal de adição solidificado. Esse filme de impurezas é resultado de um ataque do meio sobre o metal e consiste em óxidos, sulfatos, carbonatos ou outros produtos corrosivos [2]. Essas impurezas ficam entre o metal de adição e o de base interferindo na continuidade metálica. Mesmo que haja uma ligação forte entre o filme e os metais, a junta ficará fragilizada, pois ela terá propriedades piores influenciadas pelas impurezas associadas ao metal.

Para a formação de uma junta considerada boa para aplicação em Engenharia, deve-se retirar essas impurezas, durante a soldagem, com o auxílio de formulações químicas ativadas termicamente que são os fluxos.

Para que um líquido molhe um substrato sólido é necessário que haja uma certa afinidade química entre as duas fases, seja a formação de solução sólida seja a formação de intermetálicos. A capacidade de um líquido de se espalhar sobre um sólido de forma espontânea e atingir uma forma de equilíbrio é conhecida como molhabilidade.

Considerando uma gota de metal de adição líquido sobre uma superfície metálica (metal de base) horizontal em uma atmosfera fluxante, pode-se identificar três interfaces distintas: interface líquido/sólido, interface líquido/vapor e interface sólido/vapor.

Geralmente a limpeza da superfície do metal de adição e do metal base é feita por fluxos na forma líquida. Portanto a fase de vapor, em soldagem branda, pode ser

substituída por uma fase líquida do fluxo ("fase fluxo"). Daí as interfaces seriam: interface líquido/fluxo, interface líquido/sólido e interface sólido/fluxo.

O molhamento depende, além da viscosidade, das energias de interface sólido/líquido (γ_{SL}), líquido/fluxo (γ_{LF}) e sólido/fluxo (γ_{SF}), mostradas na Figura 17.

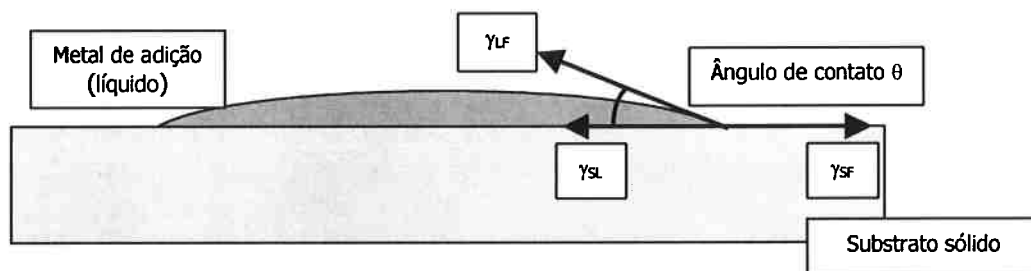


Figura 17: Esquemática de um líquido molhando um substrato sólido, das energias de superfície e do ângulo de contato.

A energia de superfície pode ser explicada em escala atômica. Um átomo está com o mínimo de energia quando ele está na sua posição de equilíbrio e quando toda a vizinhança está ocupada por átomos nas posições de equilíbrio. Na superfície, essa condição de equilíbrio não é satisfeita, pois, em média, os átomos possuem somente metade das vizinhanças [2,4]. Essa condição de falta de ligações na superfície, relacionada com a mudança de coordenação dos átomos, faz com que haja um aumento de energia no sistema. Essa energia é conhecida como energia de superfície. A energia interfacial pode ser entendida de modo análogo.

Essa situação pode ser ilustrada na Figura 18. Nota-se que o átomo A está na posição de equilíbrio, enquanto que os átomos B e C possuem menos ligações. Essa falta de ligações é a causa da energia de superfície (como mencionado anteriormente). Nessa figura, os átomos estão arranjados de modo ordenado como em um reticulado cristalino para um tratamento mais simplificado. Apesar dessa simplificação, o modelo é bastante útil para o entendimento do conceito.

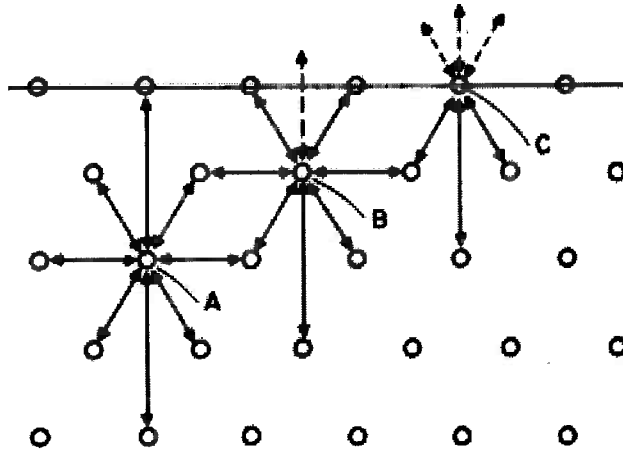


Figura 18: Modelo simplificado explicando energia de superfície [2].

Voltando a Figura 17, os vetores que representam as energias interfaciais podem ser considerados como forças que equilibram o sistema. Observa-se nessa figura que o vetor γ_{LF} tende a minimizar a superfície do metal de adição. Se não houvesse nenhuma outra força agindo sobre a gota, o formato dela seria de uma esfera perfeita. Porém, como há as outras energias de interface, o formato da gota é ovalado.

Define-se linha de contato como a linha comum às três fases e o ângulo entre os vetores γ_{LF} e γ_{SL} é conhecido como ângulo de contato.

Fazendo-se o balanço da energia como balanço de forças [2], tem-se:

$$\gamma_{SF} = \gamma_{SL} + \gamma_{LF} \cdot \cos\theta \quad (2)$$

Ou:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SF} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LF}} \quad (3)$$

Essa relação é conhecida como equação de Young. Pode-se notar na equação 2 que o vetor γ_{SF} (energia interfacial entre o sólido e o fluxo) representa a força responsável pelo espalhamento.

A partir dessa relação pode-se distinguir três situações que a gota de metal de adição pode assumir [1, 2, 3, 4]:

- $\theta > 90^\circ \rightarrow$ Nesse caso, o líquido possui pouca afinidade com o sólido. Para $\theta > 90^\circ$, o produto $\gamma_{LV} \cdot \cos\theta$ será menor que zero e para isso tem-se $\gamma_{SL} > \gamma_{SV}$ e a gota não molha o substrato sólido. Na condição limite ($\theta = 180^\circ$), o líquido assume um formato esférico.

- $90^\circ > \theta > M \rightarrow$ Nesse caso, há molhamento parcial (molhamento razoável) da gota sobre o sólido. O valor de M é arbitrário e depende, principalmente, do tipo de aplicação do sistema de solda. Geralmente o valor de M é menor ou igual a 75° .
- $\theta < M \rightarrow$ O valor de M foi definido no item anterior. Nesse caso, ocorre um bom molhamento. Quando θ tende a 0° , tem-se a situação de molhamento ideal.

Cada um destes três casos está ilustrado na Figura 19.

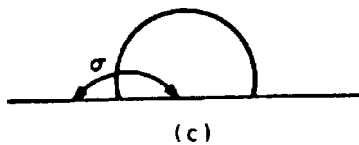
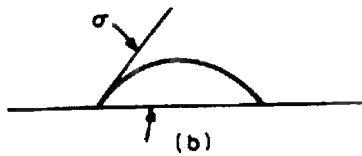
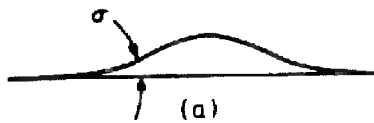


Figura 19: Grau de molhamento em relação ao ângulo de contato. (a) molhamento total ($\theta = 0^\circ$) (b) molhamento parcial ($90^\circ < \theta < M$) (c) não molhamento ($\theta = 180^\circ$) [3].

Durante o fenômeno de molhamento ocorre, ainda, o espalhamento do líquido sobre o sólido. O espalhamento pode ser definido como um fenômeno no qual há o aumento gradual da área de contato entre o líquido e o substrato sólido, até atingir a área de equilíbrio [9].

Em uma abordagem termodinâmica, os fenômenos de molhamento e de espalhamento são acompanhados pela diminuição da energia livre de Helmholtz (F) em função da área sólido / líquido (A_{SL}), ou seja:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial A_{SL}} \right)_{V,T} < 0 \quad (4)$$

Em uma inspeção visual das juntas podem ser observados vários tipos de juntas finais, dependendo do ângulo de contato. A tabela 5 pode ser utilizada como um exemplo de critério de inspeção.

Tabela 5: Critério de inspeção de juntas [Adap. Ref. 1]

Tipo de molhamento	Ângulo de contato	Descrição
Bom molhamento	Entre 0° e M *	O ângulo de contato é pequeno. A superfície da solda é brilhante lisa.
Mau molhamento	Entre M e 90°	O ângulo de contato é grande. A superfície da solda não é contínua e é irregular. Existem áreas não molhadas.
Demolhamento e não molhamento	Entre 90° e 180°	A solda não cobre totalmente a superfície e possui grande ângulo de contato. A solda aparece como gotas ou esferas.
Junta fria	Geralmente pequeno	A junta possui aparência fosca e granulada por causa de movimentos durante a solidificação da solda.

* M = 75°

Existe um caso importante em que, depois de ter ocorrido molhamento e espalhamento, o ângulo de contato vai aumentando gradualmente até que a solda se retrai em glóbulos. A aparência final da junta é um filme de solda bastante fino na qual os glóbulos se depositam. Essa sucessão de eventos é conhecida como demolhamento.

Se durante o resfriamento da liga ocorrer uma perturbação (pequena que ela seja) a superfície da junta resultante pode ficar com uma aparência fosca e/ou granulada. As propriedades físicas da junta ficam bastante prejudicadas e em condições extremas a junta pode fraturar. A estas características denomina-se junta perturbada ou junta "fria" [2].

As Figuras 20, 21, 22 e 23 mostram os casos em que ocorre bom molhamento, mau molhamento, demolhamento e juntas frias.

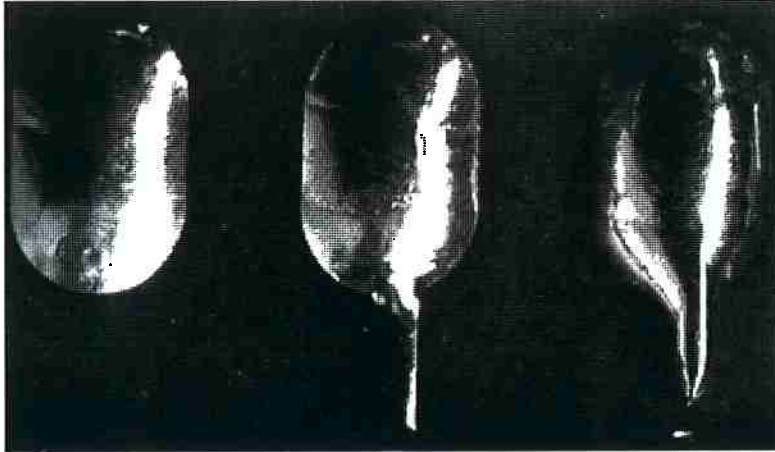


Figura 20: Bom molhamento [2].

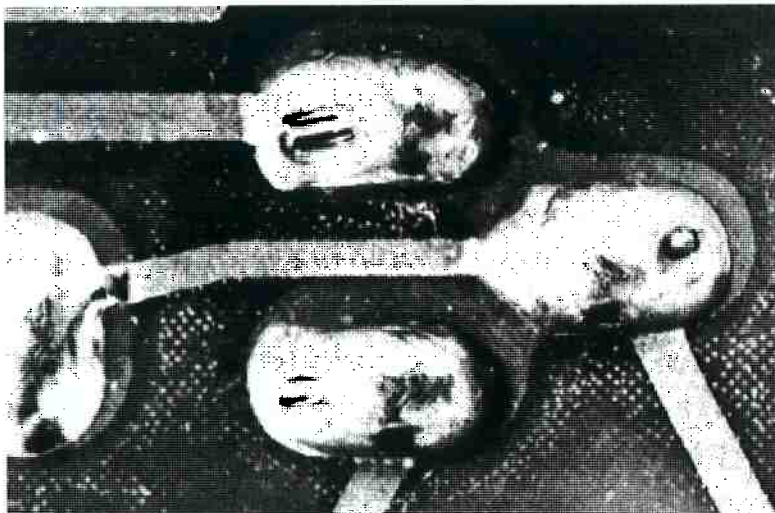


Figura 21: Mau molhamento [2].

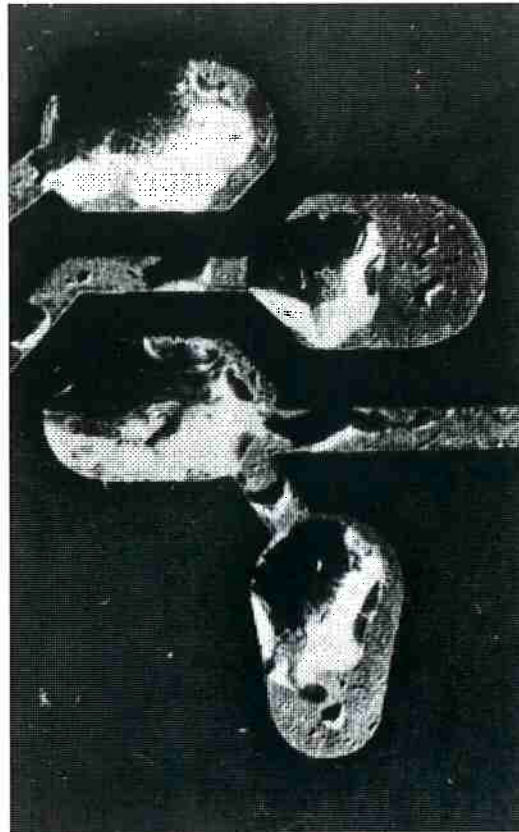


Figura 22: Demolhamento [2].

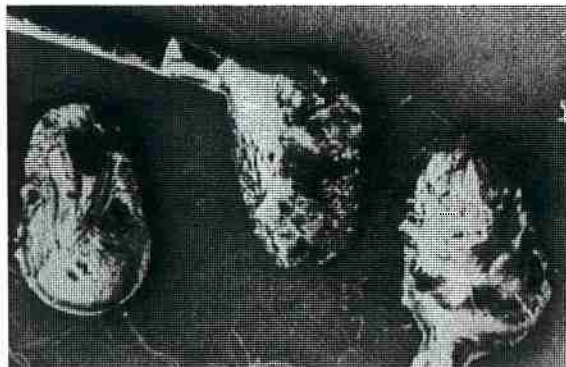


Figura 23: Juntas frias[2].

Como foi mencionado anteriormente, o molhamento ou não do metal de adição depende das condições iniciais da superfície do metal base. A presença ou não de impurezas e óxidos na superfície do metal irá definir a formação de uma boa ou de uma má junta. Além disso, o molhamento depende também da composição da liga do metal de adição, das condições do fluxo e da temperatura do ensaio.

A umidade e a temperatura do ambiente em que é manipulada a pasta podem mudar a composição do fluxo e degradá-la. Esse fenômeno pode afetar a molhabilidade e o espalhamento, prejudicando o processo de soldagem.

O mau espalhamento influi na área de contato elétrico entre os componentes e a placa, afetando o desempenho do equipamento. Em outras palavras, afeta o preenchimento das juntas entre os terminais dos componentes e as trilhas de cobre nas placas. A Figura 24 apresenta esquematicamente o molhamento e o espalhamento (a) do um líquido sobre um sólido e o não molhamento do sólido (b).

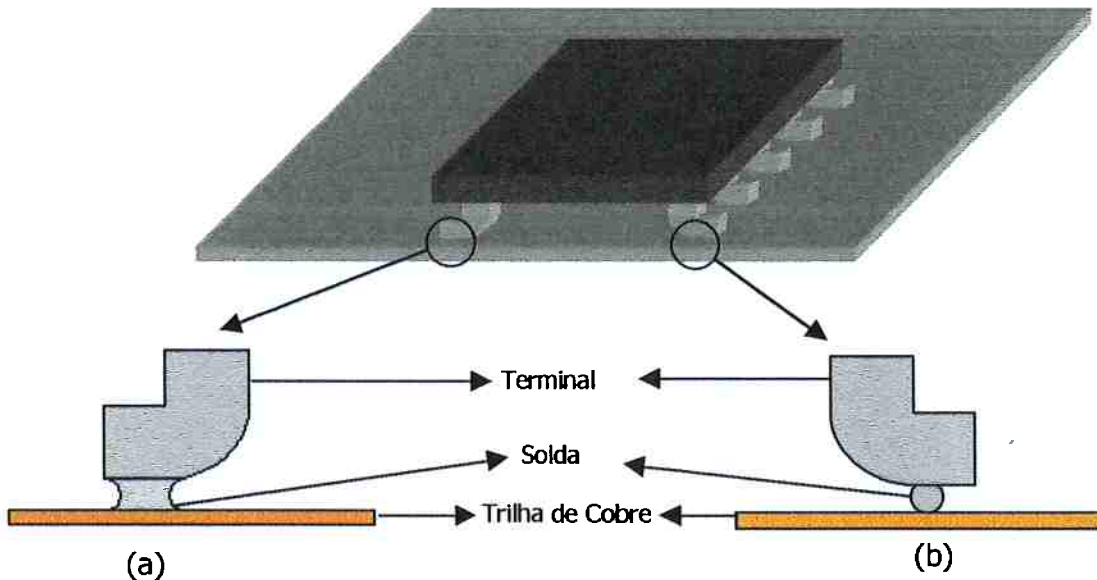


Figura 24 : Esquema do molhamento e espalhamento (a) e não molhamento e não espalhamento (b) de soldas nos terminais dos componentes eletrônicos.

Para que seja medido o grau de molhabilidade de um líquido, pode-se utilizar diversos ensaios, como o ensaio da gota séssil, ensaio de Wilhelmy ou ensaio da balança de molhamento e o ensaio da balança de micromolhamento, por exemplo.

2.9 Ensaio de Wilhelmy ou Ensaio da balança de molhamento

A balança de molhamento mede a força vertical de empuxo e com a análise de dados é possível a obtenção da tensão superficial quando uma peça, já devidamente limpa e desoxidada (com ajuda de fluxo), é imersa em um banho de metal de adição.

Este ensaio foi proposto em 1863 [10] para a determinação da energia de superfície de um líquido. Há variantes desse método que são utilizados para as adições de soldagem branda [11–13].

Neste ensaio, uma placa de um certo material é imersa num líquido. Através do peso aplicado sobre a placa em função do tempo, pode-se calcular a energia de superfície. Esse método é utilizado para a medição da soldabilidade de um componente

que é imerso em um banho utilizando-se uma velocidade de imersão bastante alta. Com velocidades altas de imersão do componente no banho ocorre, inicialmente, não molhamento ou pouco molhamento do metal de adição sobre o componente e observa-se uma força vertical aplicada sobre o componente.

Pela Figura 25 pode-se observar o que acontece com a placa no início da imersão. A superfície do metal de adição é forçada para baixo de forma que se forma um vale em volta da superfície do componente. Dessa forma o metal de adição força a placa para cima. Essa força é produzida pela tensão superficial da solda. Na Figura 25 observa-se que, como o ângulo de contato é maior que 90° , não ocorre molhamento do componente pelo metal líquido [14].

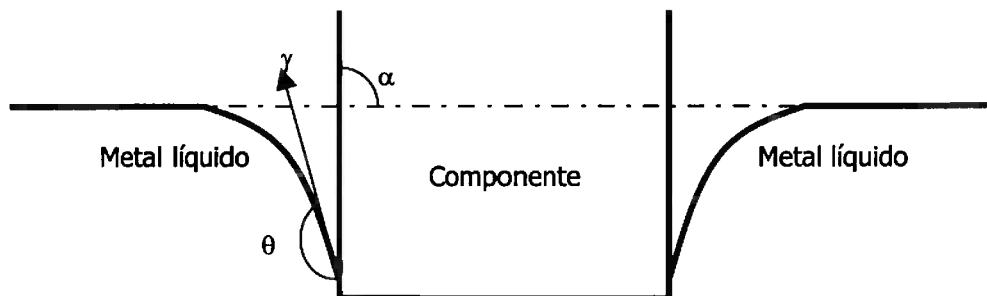


Figura 25: Início do ensaio de Wilhelmy.

Na Figura 25 pode-se observar três grandezas que devem ser conhecidas: ângulo de imersão da placa em relação ao banho de metal líquido (α), tensão interfacial líquido / vapor (ou fluxo) (γ) e ângulo de contato (θ). Mais adiante será descrito como o ângulo de imersão pode influenciar nos resultados obtidos.

Com a imersão da placa ocorre deslocamento de um volume de metal líquido igual ao volume da placa imersa. Isso resulta em uma força contrária à imersão conhecida como força de Arquimedes ou, simplesmente, empuxo.

Durante o ensaio o metal líquido começa a molhar o componente mudando totalmente o sentido da força que é aplicada sobre o componente. O componente, agora, é puxado no sentido do banho. Isso pode ser observado na Figura 26. Nota-se que nesse caso o ângulo de contato fica menor que 90° , indicando que há molhamento. A altura H do menisco formado durante o molhamento indica a soldabilidade do componente. Quando maior a altura do menisco maior é a soldabilidade. A altura máxima do menisco depende da tensão superficial e da densidade do metal líquido.

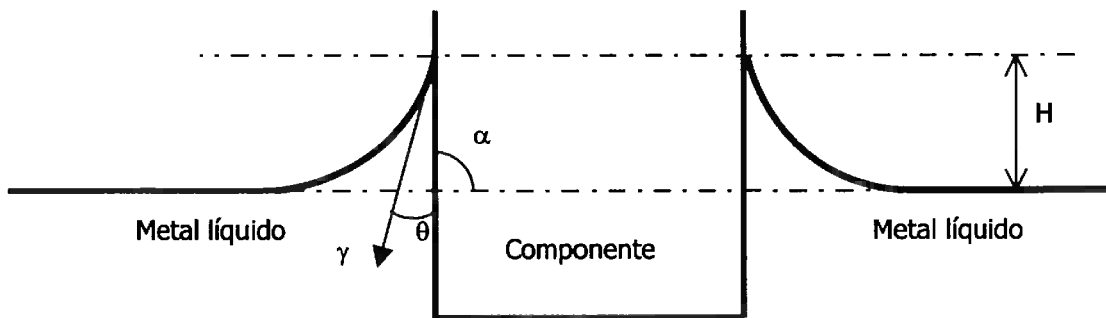


Figura 26: Final do ensaio de Wilhelmy.

O ensaio de Wilhelmy mede a força que está sendo aplicada sobre o componente em função do tempo. A força medida está inversamente relacionada ao ângulo de contato, ou seja, quanto menor o ângulo de contato maior será a força medida pela balança. A força medida F é dada pela seguinte relação:

$$F = \gamma \cdot p \cdot \cos(\theta) - g \cdot \rho \cdot v \quad (5)$$

Onde: γ = tensão interfacial;

p = perímetro do componente;

θ = ângulo de contato;

ρ = densidade do metal líquido;

v = volume imerso do componente;

g = aceleração da gravidade.

O primeiro termo da equação 5 representa a força de molhamento e o segundo termo é o empuxo.

Como o ângulo de contato varia no decorrer do ensaio, a força medida pela balança também varia com tempo.

Existem equipamentos que realizam o ensaio e medem a altura H e o peso W do menisco do líquido formado na placa. A partir desses valores obtidos pode-se achar os valores de γ_{LF} e de θ pela equação desenvolvida por Mayhew e Monger [15]. Como a fase vapor é substituída pelo fluxo, pode-se definir γ_{LF} como sendo a energia entre a interface líquido/fluxo.

A equação é dada por:

$$\gamma_{LF} = \frac{\rho \cdot g}{4} \left[\frac{4 \cdot W^2}{(\rho \cdot g \cdot p \cdot H)^2} + H^2 \right] \quad (6)$$

$$\theta = \arcsen \left[\frac{4 \cdot W^2 - (\rho \cdot g \cdot p \cdot H^2)^2}{4 \cdot W^2 + (\rho \cdot g \cdot p \cdot H^2)^2} \right] \quad (7)$$

A Figura 27 mostra um diagrama esquemático da balança de molhamento.

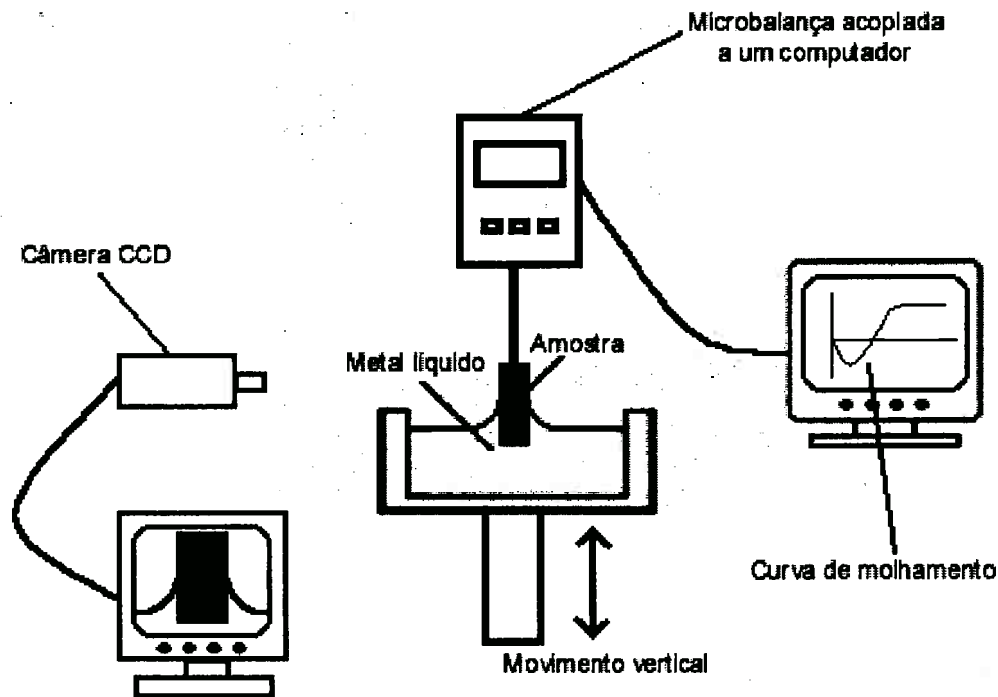


Figura 27: Diagrama esquemático da balança de molhamento

Pela figura esquemática pode-se observar que o funcionamento do equipamento é bastante simples. A amostra fica fixa em uma balança bastante sensível que é zerada quando essa amostra toca a superfície do líquido. Logo abaixo da amostra existe um cadinho móvel onde é colocado o metal líquido e mantido a temperatura constante (geralmente 235°C para 63Sn-37Pb). A microbalança fica ligada a um computador que converte os impulsos elétricos em força de molhamento. De acordo com a intensidade da corrente tem-se um certo valor de força. O computador armazena o valor dessa força para cada instante e pode-se, dessa forma, obter um gráfico força *versus* tempo, que é a curva de molhamento.

Existe, ainda, uma câmara CCD focada no corpo de prova para que seja feito um acompanhamento do processo de molhamento durante o ensaio e também para o

alinhamento do corpo de prova em relação ao banho de metal líquido, principalmente no ensaio de micromolhamento.

O ensaio consiste basicamente em monitorar a força que está sendo aplicada sobre o corpo de prova durante o ensaio. Pega-se um corpo de prova com geometria simples, geralmente com seção retangular. Limpa-se bem o corpo de prova removendo qualquer tipo de impureza (poeira, graxa, etc) e aplica-se um fluxo sobre a amostra para que a camada óxida seja removida. Fixa-se bem o corpo de prova na balança de tal forma que o ângulo de imersão seja igual a 90° . O cadinho com o metal líquido, então, sobe com uma velocidade constante e tem-se o contato elétrico entre a amostra e o metal líquido. Uma parte da amostra, já predefinida, é mergulhada no banho e cessa-se o processo de imersão. A amostra permanece nessa condição durante um certo tempo (geralmente 10s) para que seja feito um monitoramento da força que está sendo aplicada sobre o corpo de prova. O resultado do ensaio é obtido através de um gráfico força *versus* tempo (curva de molhamento).

Na Figura 28 será mostrado o esquema de uma curva de molhamento obtida pelo ensaio de Wilhelmy.

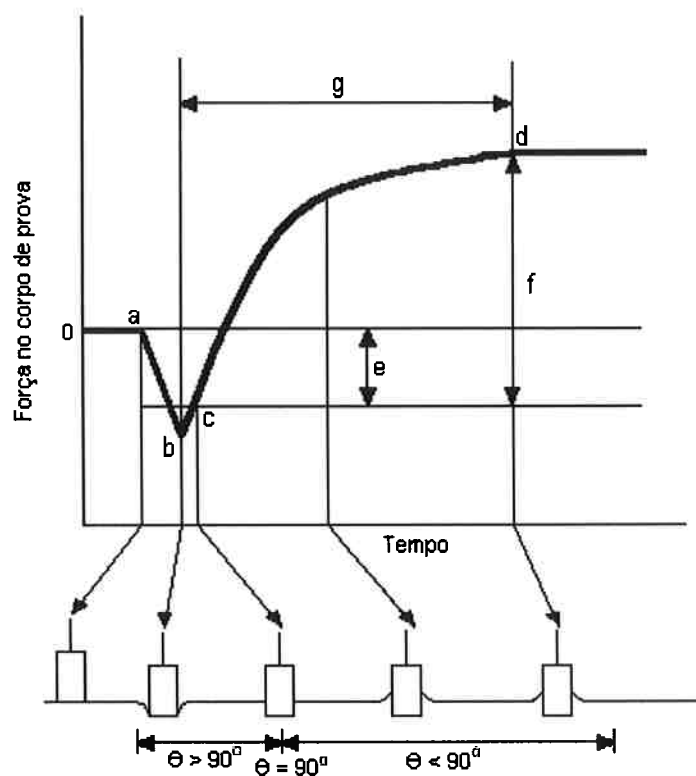


Figura 28 : Esquema de uma curva de molhamento de ensaio de Wilhelmy.

Analisando-se a Figura 28 nota-se que em (a) a amostra foi imersa no líquido e o seu peso foi zerado. Em (b) ocorre o fim da imersão. No ponto (c) observa-se que o ângulo de contato entre o líquido e a amostra é igual a 90° . Pode-se notar que a força de molhamento vai crescendo em função do tempo até que se chegue em um estado de equilíbrio, no ponto (d). Esse tempo gasto, para que se chegue no equilíbrio a partir do ponto (b), é representado por (g). Com esse gráfico, é possível, também se conhecer o empuxo e a força de molhamento. Estes são representados por (e) e (f), respectivamente.

A partir do ponto (d) pode ocorrer demolhamento do metal fundido sobre o substrato, aumentando o ângulo de contato θ . Com esse aumento do ângulo de contato ocorre a diminuição da força medida pela balança.

O comportamento da curva antes de ela alcançar o patamar estável depende dos seguintes fatores:

- Efeito do empuxo sobre a amostra;
- A formação inicial do menisco negativo;
- Condução de calor na amostra;
- Comportamento fluido do metal líquido.

Por exemplo, se a condução de calor na amostra for lenta, poderá haver formação de um patamar a partir do ponto (b). Isso ocorre, pois a amostra, nesse caso, demora um certo tempo para atingir a temperatura em que começa a ocorrer o molhamento da superfície.

A taxa de molhamento ou o coeficiente angular da curva entre os pontos (b) e (d) (molhabilidade) depende da interação entre o banho e a amostra, das propriedades do fluxo e da oxidação da amostra e da superfície do banho. Quanto maior a inclinação da curva, maior é a molhabilidade do material.

Se a velocidade de imersão for baixa ou se o componente possuir alta soldabilidade, o ponto (b) pode aparecer num ponto mais superior ou até desaparecer. Isso acontece porque a solda irá molhar mais rapidamente o componente, passando do ponto (a) diretamente para o ponto (d).

2.10 Ensaio da Balança de micromolhamento

O ensaio de molhamento ou a balança de Wilhelmy geralmente é utilizado para ensaio com corpos de prova de dimensões altas comparadas à do menisco formado durante o ensaio. A altura do menisco formado pode ser calculada através da equação 8:

$$H = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \cdot g}} \cdot 2 \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha - \theta}{2}\right) \quad (8)$$

Supondo-se: $\gamma = 0,4 \text{ N m}^{-1}$ (liga Sn-Pb)

$\rho = 8000 \text{ kg m}^{-3}$ (liga Sn-Pb)

$g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$

$\alpha = 90^\circ$ (imersão vertical)

$\theta = 0^\circ$ (molhamento total)

Tem-se que a altura do menisco (H) obtido será de aproximadamente 3,19mm. Portanto o corpo de prova deve ter no mínimo 4mm de comprimento para a realização do ensaio de molhamento.

No entanto, para os componentes eletrônicos que são soldados nas trilhas de cobre pela técnica de SMT deve-se empregar o ensaio de micromolhamento. Esse ensaio deve ser utilizado, pois, geralmente, a dimensão dos componentes não satisfaz a dimensão mínima para a realização do ensaio.

Para se realizar o ensaio nesses componentes deve-se diminuir a altura do menisco formado. Segundo a equação 8 a diminuição da altura do menisco pode ser feita através da diminuição do ângulo de imersão (α), uma vez que as outras grandezas permanecem com valores constantes. Isso pode ser feito através do encurvamento da superfície do metal líquido substituindo-se o banho de metal líquido por um glóbulo de massa conhecida. Com esse procedimento o ângulo de imersão pode ser diminuído como pode se mostrado na Figura 29 [14].

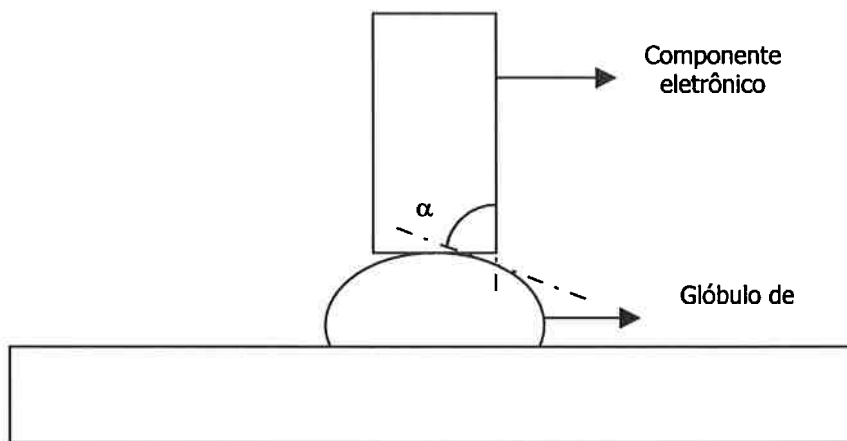


Figura 29: Diminuição do ângulo de imersão em um glóbulo de metal líquido.

Esse ensaio é uma variação do ensaio de molhamento apresentado anteriormente. Todas as condições de ensaio são iguais com exceção das condições do metal líquido onde o componente é imerso. No lugar do banho de metal líquido usa-se, no ensaio de micromolhamento, um glóbulo do metal líquido. O glóbulo fica sobre um pino de aço inox circular que está fixo em um bloco de alumínio. A massa do glóbulo pode ser variável, sendo geralmente de 200mg até 25mg.

Existe uma diferença que deve ser notado na Figura 30 entre o do ensaio de micromolhamento e de molhamento [14].

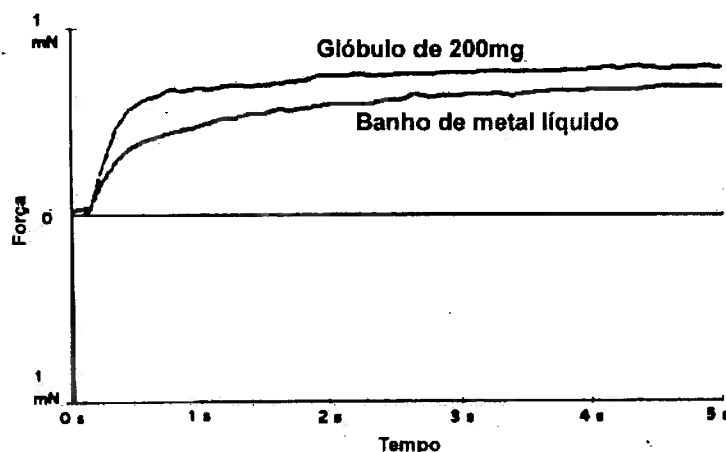


Figura 30: Diferença nos resultados entre o ensaio de molhamento e ensaio de micromolhamento

Na Figura 30, capacitores 1206 foram ensaiados em banho de metal líquido e em um glóbulo de 200 mg. As condições de ensaio foram iguais para os dois experimentos. Observa-se na figura que a força de molhamento foi maior para o ensaio de micromolhamento. Isso ocorre porque no ensaio de micromolhamento o glóbulo de metal

líquido tem dimensão finita comparada à do componente ensaiado. Conseqüentemente, depois que ocorre o molhamento do componente, há distorção na geometria do glóbulo. Portanto ocorre a introdução de uma nova força que é responsável pela distorção do glóbulo de metal líquido.

Justamente por causa dessa força extra é que o ensaio de micromolhamento é mais recomendado para componentes eletrônicos. Essa força de distorção aumenta a precisão do ensaio em relação a soldabilidade do componente.

2.11 Mecanismos de estabilização de dispersões

Foi visto em relatórios anteriores que a pasta, quando degradada, sofre o fenômeno da floculação. Isso ocorre devido à desestabilização da dispersão, que afeta bastante a viscosidade das pastas aumentando-a. É importante o conhecimento dos mecanismos de estabilização para se conhecer um procedimento para resolver o problema. Para que exista uma estabilização da dispersão, as forças repulsivas entre as partículas devem superar as forças atrativas. Existem basicamente três mecanismos de estabilização de dispersões [16]:

- Estabilização eletrostática
- Estabilização estérica
- Estabilização eletroestérica

A estabilização eletrostática se refere ao desenvolvimento de cargas elétricas repulsivas na superfície das partículas devido à interação destas no meio em que estão dispersos. A geração destas cargas depende basicamente do pH do meio. A medida do grau de estabilização pode ser feita com a avaliação do potencial zeta (já mencionado em relatórios anteriores) que é uma grandeza diretamente relacionada à estabilização eletrostática.

A estabilização estérica ocorre através da adsorção de um polímero na superfície das partículas, de forma que existe uma barreira física que impedem a floculação da dispersão. Ou seja, a adsorção de macromoléculas impede que as partículas se aproximem da região de forte atuação das forças de Van der Waals.

O mecanismo de estabilização eletroestérica é uma mistura dos dois mecanismos acima mencionados. O polímero adsorvido na superfície da partícula possui grupos

funcionais ionizáveis que liberam íons com cargas repulsivas. Portanto além da barreira física proporcionada pelo polímero adsorvido ocorre a repulsão através do mecanismo eletrostático.

3. Materiais e Métodos

As pastas estudadas foram as pastas da Multicore AGS 90 RP11 e Multicore AGS 90 RM92 ambas com liga Sn63-Pb37. Algumas amostras destas pastas foram colocadas fora da refrigeração para que houvesse degradação do fluxo.

1. Determinação de porcentagem em massa de metal na pasta;
2. Granulometria;
3. Ensaio de molhamento;
4. Ensaio de espalhamento;
5. Medição da viscosidade;
6. Observações das partículas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV);
7. Medição do Potencial Zeta;
8. Ensaio de molhamento na balança de Wilhelmy.

A seguir serão mostrados os procedimentos e os resultados obtidos em cada ensaio.

3.1 Determinação de porcentagem em massa de metal na pasta

Materiais utilizados:

- ◆ Béquer de pirex de 100ml;
- ◆ Balança digital com precisão de 0,00005g;
- ◆ Placa de aquecimento;
- ◆ Pinça;
- ◆ Álcool isopropílico (isopropanol).

Procedimento do ensaio:

O procedimento escolhido foi utilizado para os dois tipos de pasta de solda.

1. Pesou-se o béquer vazio e limpo e anotou-se a sua massa (M_1);
2. Pesou-se aproximadamente 10g de pasta de solda dentro do béquer e anotou-se a massa total (M_2);
3. Colocou-se o béquer sobre a placa de aquecimento com temperatura de aproximadamente 400°C;
4. Retirou-se o béquer da placa de aquecimento, quando o metal fundiu e ficou aglomerado em uma única massa;
5. Deixou-se a solda solidificar;
6. Quando a solda resfriou, retirou-se o metal do béquer e limpou-se com álcool isopropílico;
7. Depois de totalmente limpo, pesou-se o metal;
8. Anotou-se a massa do metal (M_m);
9. Calculou-se a fração em massa do metal:

$$\%Metal = \frac{M_m}{M_2 - M_1} \cdot 100\% \quad (9)$$

3.2 Ensaio de granulometria

Os ensaios de granulometria foram realizados no equipamento Malvern 2600 com o compartimento de amostra de pequenos volumes dotado de um agitador, o solvente utilizado foi o álcool isopropílico e o procedimento adotado está descrito abaixo.

Procedimento do ensaio:

1. Limpou-se o compartimento da amostra 3 vezes com água com o agitador ligado;
2. Limpou-se o compartimento da amostra mais 3 vezes com água deionizada com o agitador ligado;
3. Limpou-se o compartimento da amostra 2 vezes com álcool isopropílico com o agitador ligado;

4. Fez-se o ensaio com álcool isopropílico puro para verificar se existe alguma partícula suspensa no álcool;
5. Satisfeita a condição de não existir partículas suspensas, seguiu-se a rotina do programa do equipamento (alinhamento do feixe de laser, definição dos dados, etc). A quantidade de pasta utilizada era definida pelo próprio programa que indicava através de uma barra se a quantidade era boa para a tomada de dados;
6. Fez-se a tomada de dados;
7. Repetiu-se a operação duas vezes para cada tipo de pasta.

3.3 Ensaio de molhamento

Materiais utilizados

- Estêncil;
- Lâmina para barbear;
- Placa quente;
- Solução aquosa de 10% em volume de ácido fluorbórico;
- Materiais de plástico para manusear o ácido (béquer, pinça, proveta, entre outros);
- Corpos de prova de cobre com 25,4mm (1") de diâmetro e 5,6mm de espessura (0,22")

Como não foi possível a compra do estêncil em uma empresa especializada, o estêncil utilizado foi confeccionado furando-se uma folha fina (de aproximadamente 0,06mm) de uma adição para brasagem com um furador comum de papel. Foram feitos três furos com diâmetro de 0,70mm que foram arranjados de uma forma, que ligando-se os centros, obtém-se um triângulo equilátero. Tomou-se um cuidado especial para que a distância entre os perímetros das aberturas não fossem menores que 0,635cm (0,25pol).

Não foi possível também a compra dos corpos de prova de cobre com as dimensões especificadas. Para obtê-las foi preciso comprar um tarugo de cobre com 1 polegada de diâmetro e cortá-lo em vários corpos de prova.

Procedimento do ensaio

- Preparou-se três corpos de prova de cobre, fazendo-se a decapagem delas na solução de ácido fluorbórico. A decapagem foi feita da seguinte maneira:
 - Mergulharam-se os corpos de prova por 2 minutos na solução de ácido fluorbórico;
 - Depois que os corpos de prova foram retirados da solução, enxaguou-se os corpos de prova com água deionizada. Repetiu-se o processo cinco vezes.
- Estabilizou-se a temperatura da placa quente a 230°C;
- Oxidaram-se e identificaram-se as amostras de cobre. A oxidação foi feita da seguinte forma:
 - Colocou-se um dos corpos de prova sobre a placa quente por 15 segundos;
 - Colocou-se o segundo corpo de prova sobre a placa quente por 30 segundos;
 - Colocou-se o terceiro corpo de prova sobre a placa quente por 45 segundos.
- Pesaram-se os corpos de prova;
- Aplicou-se a pasta sobre os corpos de prova espalhando-se a pasta sobre o estêncil com a ajuda da lâmina de barbear;
- Estabilizou-se a placa quente a uma temperatura de $(25\pm 3)^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura *liquidus* da liga da pasta;
- Colocaram-se os corpos de prova sobre a placa quente e esperou-se que ocorresse a fusão da pasta sobre eles;
- Limparam-se os corpos de prova pela técnica de ultra-som em álcool para se retirar os resíduos da pasta;
- Verificou-se a ocorrência de molhamento, não-molhamento ou demolhamento da liga fundida.

3.4 Ensaio de espalhamento

Materiais utilizados

- Estêncil;
- Lâmina para barbear;
- Placas de vidro foscas com dimensões de 7,6cm x 2,5cm e 1mm de espessura;
- Forno tubular.

O estêncil utilizado neste ensaio é o mesmo do descrito anteriormente.

Procedimento do ensaio

- Estabilizou-se o forno a uma temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$;
- Aplicou-se a pasta sobre a lâmina de vidro espalhando-se a pasta sobre o estêncil com a ajuda da lâmina de barbear;
- Tirou-se a foto da amostra juntamente com uma escala;
- Colocou-se a amostra dentro do forno por 10 ± 2 minutos. O tempo entre a aplicação da pasta e a realização do ensaio foi de 5 a 10 minutos;
- Retirou-se a amostra do forno;
- Tirou-se outra foto da amostra juntamente com uma escala.
- Depois da obtenção das fotos (antes da exposição e depois da exposição), mediu-se o diâmetro das deposições em quatro direções e tirou-se a média;
- Calculou-se o valor do espalhamento, através da fórmula

$$\%Espalhamento = \frac{d_D}{d_C} \cdot 100\% \quad (10)$$

onde:

d_D = média do diâmetro da deposição depois da exposição;

d_C = média do diâmetro da deposição antes da exposição.

3.5 Medições da viscosidade

O ensaio de viscosidade teve por finalidade descobrir se a degradação influía nessa grandeza.

Materiais utilizados

- Viscosímetro Brookfield modelo RV-III;
- "Spindle" Helipath T-F;
- Espátula;

Procedimento do ensaio

- Misturou-se homogeneamente a pasta de solda com a espátula;
- Esperou-se que as pastas não degradadas atingissem a temperatura ambiente;
- Programou-se o computador para que o ensaio fosse realizado a rotações crescentes a partir de 0,5 rpm até 42,5 rpm. Os passos foram de 2 rpm. Cada rotação permaneceu constante durante 30 segundos e, depois disso, fez-se a leitura da viscosidade;
- Depois dessa curva de "subida" programou-se o computador para que fossem realizadas as leituras para rotações decrescentes. A rotação começou a partir de 42,5 rpm até 0,5 rpm como no procedimento anterior;

3.6 Observações no Microscópio Eletrônico de varredura

Foram feitas observações das pastas degradadas para verificar se houve floculação das partículas metálicas que estão dispersas na pasta.

Materiais utilizados

- Pastas de solda não degradadas e degradadas;
- Placas de vidro;
- Lâmina de barbear.

Procedimento do ensaio

- Preparou-se uma amostra padrão lavando-se a pasta não degradada em álcool etílico;
- Secou-se a fração metálica em uma estufa a 50°C;
- Colou-se uma fita dupla-face de carbono sobre uma placa de vidro e pulverizou-se o pó seco na fita;
- Espalharam-se, com a ajuda da lâmina de barbear, as pastas degradadas sobre as placas de vidro, de modo que a camada espalhada fosse bastante fina;
- Secaram-se as lâminas em uma estufa para que os solventes da pasta fossem eliminados;
- Fez-se recobrimento das placas de vidro com carbono;
- Observaram-se as amostras no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

3.7 Medição do Potencial Zeta

O equipamento utilizado para a medição do Potencial Zeta foi a MATEC APPLIED SCIENCE, modelo ESA-8000. Esse equipamento utiliza o princípio correspondente aos fenômenos eletroacústicos.

O objetivo do ensaio é verificar se o mecanismo de floculação é regido pela mudança da distribuição de cargas na superfície das partículas.

Procedimento do ensaio

- Limpou-se, com água deionizada, o recipiente em que foi colocada a amostra.
- Prepararam-se 220 ml de uma dispersão de álcool isopropílico (isopropanol) com 2% em volume de partículas metálicas. Dissolveu-se bem a pasta para que não formasse aglomerados de partículas de solda.
- Ajustou-se a temperatura do banho de água para que a temperatura da amostra estivesse constante e igual a 25°C.

- Entrou-se com os dados relevantes do ensaio para o cálculo do potencial zeta (velocidade do som no álcool isopropílico, densidade das partículas, constante dielétrica do álcool isopropílico, concentração das partículas na dispersão, etc).
- Fez-se a medição.

3.8 Ensaio de molhamento (Balança de Wilhelmy)

O equipamento utilizado no ensaio foi uma balança de molhamento da Multicore modelo MUST II. O equipamento utilizado está ilustrado na Figura 31.

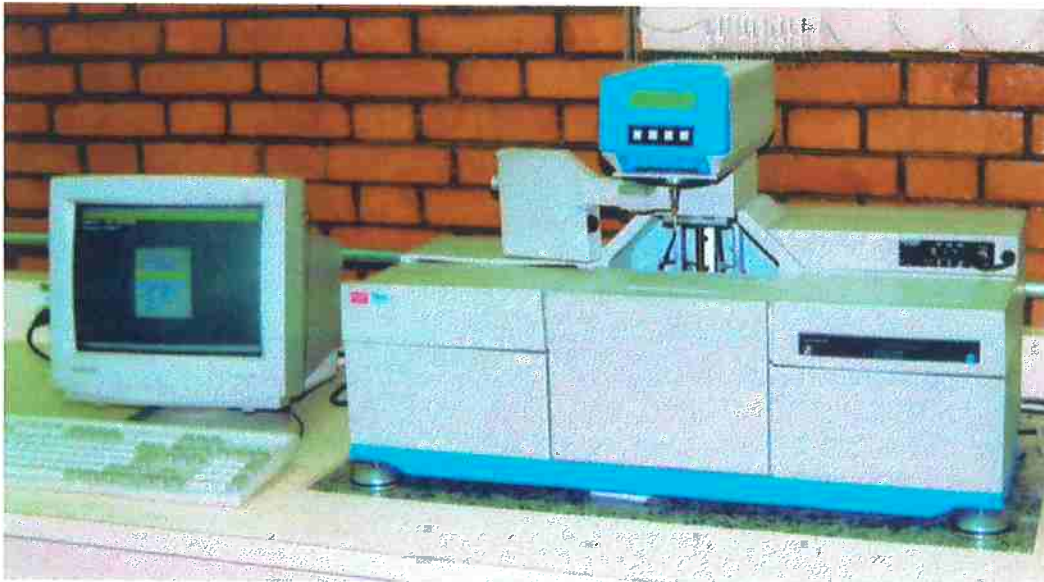


Figura 31: Equipamento utilizado no ensaio de Wilhelmy

Foi necessária a fabricação de um adaptador sobre o pino onde o ensaio foi realizado. O adaptador consistia em um anel de grafite que era encaixado sobre o pino. A função desse anel foi de impedir o extravasamento da pasta depois que ele é colocado sobre o pino. Depois que o metal se funde ocorre a sua aglomeração na parte central que é formada de aço inoxidável. O fluxo fica distribuído no glóbulo e na periferia do anel. A Figura 32 se refere a essa adaptação.

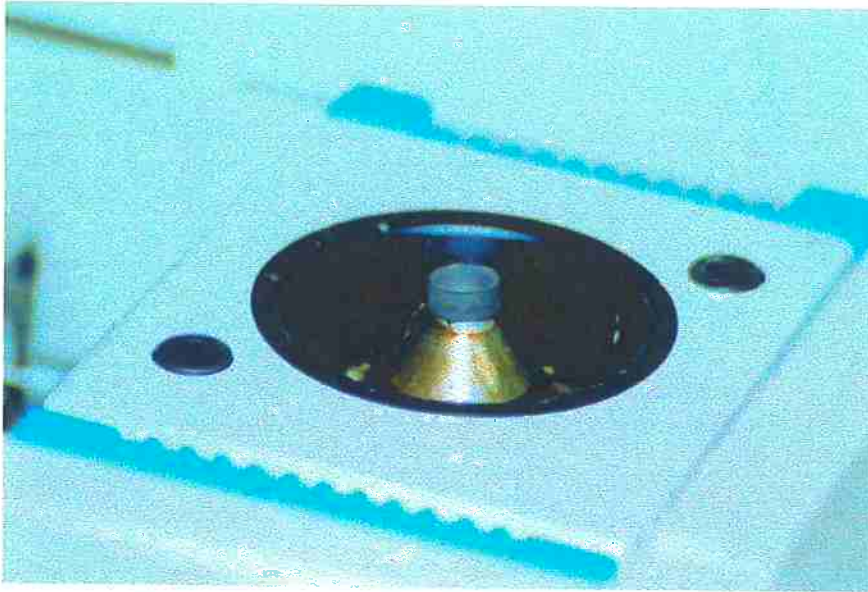


Figura 32: Adaptação do substrato para o ensaio de Wilhelmy

O componente eletrônico utilizado foi o capacitor do tipo 1206.

Procedimento do ensaio

- Preparou-se todo o equipamento (balança de Wilhelmy ou de molhamento) para o ensaio.
- Pesaram-se 240mg de pasta. Essa massa já incluía as perdas de pasta que ocorrem durante o ensaio e a massa do fluxo. A massa de metal foi de aproximadamente 200 mg como exige o procedimento do ensaio.
- Pré aqueceu-se o pino (já com a adaptação feita) a 100°C.
- Colocou-se a pasta de solda sobre o pino.
- Aqueceu-se o pino até 235°C e verificou-se que o metal está líquido.
- Fixou-se o componente na balança com o porta-amostra adequado.
- Realizou-se o ensaio obedecendo-se ao procedimento do equipamento. No final do ensaio o equipamento fornece um gráfico força *versus* tempo que foi analisado.

4. Resultados e discussão

4.1 Ensaio de determinação de porcentagem de metal

As pastas ensaiadas foram as não degradadas.

Durante o aquecimento observaram-se, nas duas pastas de solda, as seguintes etapas:

- ◆ Diminuição da viscosidade (a pasta começou a fluir mais facilmente);
- ◆ Formação de uma névoa branca (evaporação dos solventes);
- ◆ Liquefação do fluxo;
- ◆ Fusão da solda;
- ◆ Formação de uma massa única de solda fundida envolta pelo fluxo.

Os metais obtidos estavam envoltos pelo fluxo que ficou bastante rígido depois da solidificação. O fluxo tinha uma coloração marrom escuro.

O processo de limpeza escolhido foi o de ultra-som.

Os resultados obtidos para a pasta RM92 estão na Tabela 6:

Tabela 6: Fração em massa do metal para a pasta RM92

M₁ (g)	M₂ (g)	M_m (g)	%Metal (%)
49,3339	59,4951	9,0594	89,16
49,3342	59,7362	9,2946	89,35
49,3343	59,5506	9,1339	89,41
		Média	89,31±0,13

Os resultados obtidos para a pasta RP11 estão na Tabela 7:

Tabela 7: Fração em massa do metal para a pasta RP11

M₁ (g)	M₂ (g)	M_m (g)	%Metal (%)
49,3345	59,5555	9,1543	89,56
49,3351	59,5951	9,2016	89,68
49,3345	59,4697	9,0894	89,68
Média			89,64±0,07

O resultado indica que a porcentagem média de metal para a pasta RM92 foi de (89,31±0,13)% enquanto que para a pasta RP11 esse valor foi de (89,64±0,07)%.

Os resultados indicam que a porcentagem em massa de metal é de aproximadamente 90% nas duas pastas. Esses resultados são bastante coerentes, já que essas duas pastas são aplicadas em placas pela técnica de "Stencil Printing" (segundo o fabricante). Como foi visto anteriormente, as pastas de solda que são aplicadas por esse método geralmente possuem aproximadamente 90% em massa de metal.

4.2 Ensaio de granulometria

As pastas ensaiadas foram as não degradadas. Como especificado no procedimento do ensaio, foram feitas duas medidas para cada pasta. Para a pasta RM92 obtiveram-se os mostrados nas Tabelas 8 e 9 e nas Figuras 33 e 34.

Tabela 8: Distribuição granulométrica das partículas para pasta RM92 (medição 1)

Diâmetro(μm)	Porcentagem (%)
57,3	4,3
53,3	8,5
49,5	10,5
46,1	11,5
42,8	11,8
39,8	11,5
37,0	10,6
34,4	9,3
32,0	7,8
29,8	6,2
27,7	4,5
25,8	2,8
24,0	0,6

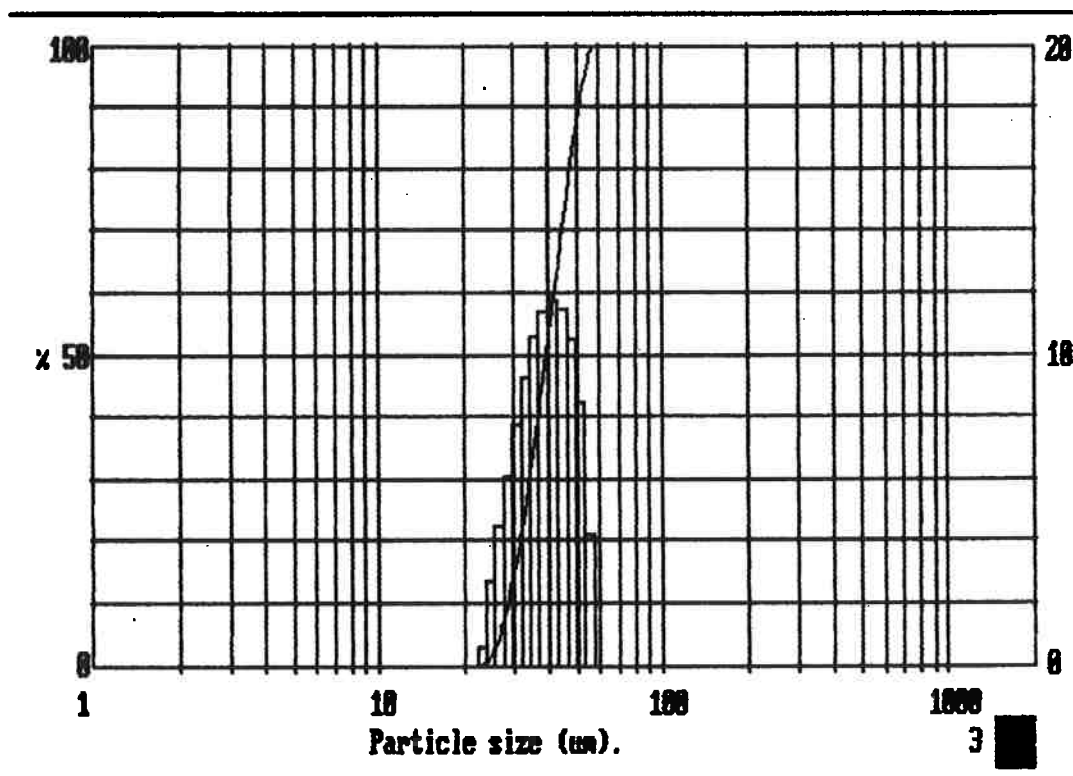


Figura 33: Gráfico de distribuição granulométrica para a pasta RM92 (medição 1).

Tabela 9: Distribuição granulométrica das partículas para pasta RM92 (medição 2)

Diâmetro(μm)	Porcentagem (%)
57,3	4,4
53,3	8,8
49,5	10,8
46,1	11,8
42,8	12,0
39,8	11,6
37,0	10,6
34,4	9,2
32,0	7,6
29,8	5,8
27,7	4,2
25,8	2,5
24,0	0,6

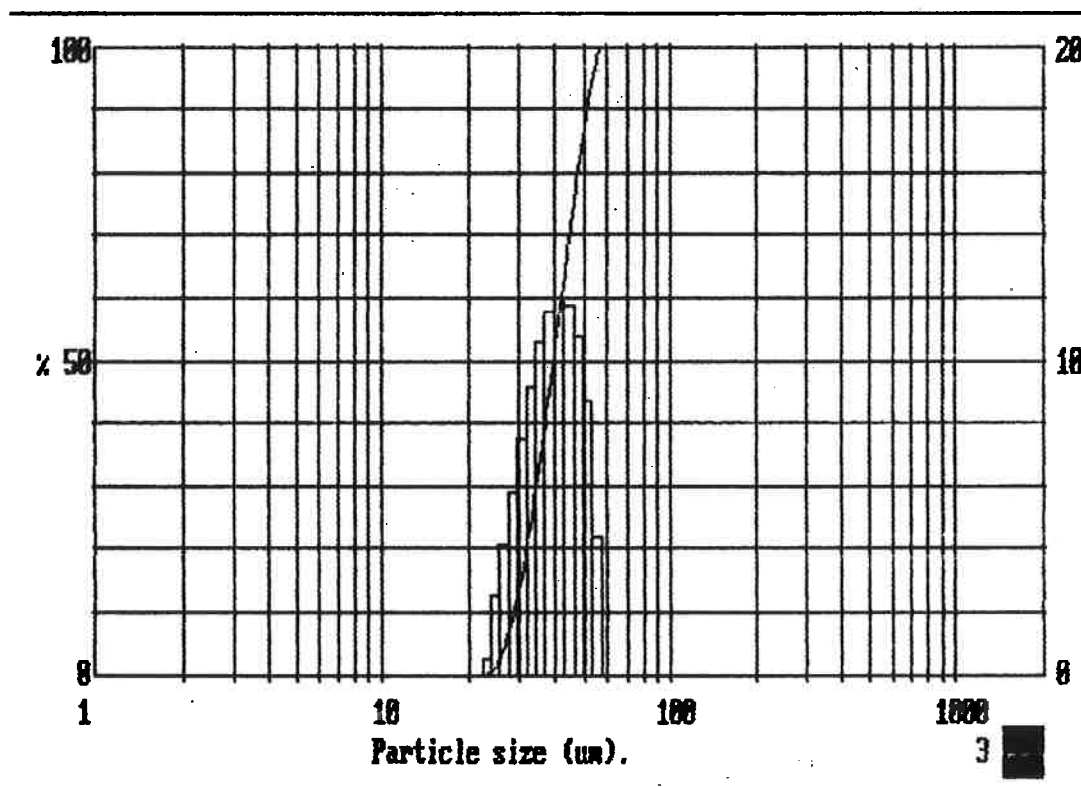


Figura 34: Gráfico de distribuição granulométrica para a pasta RM92 (medição 2).

Observa-se que o diâmetro médio das partículas está em torno de 39 μm .

Para a pasta RP11 temos os resultados mostrados nas Tabelas 10 e 11 e nas Figuras 35 e 36.

Tabela 10: Distribuição granulométrica das partículas para a pasta RP11 (medição 1)

Diâmetro(μm)	Porcentagem (%)
57,3	4,0
53,3	7,9
49,5	9,8
46,1	10,9
42,8	11,3
39,8	11,1
37,0	10,6
34,4	9,7
32,0	8,4
29,8	6,9
27,7	5,3
25,8	3,3
24,0	0,8

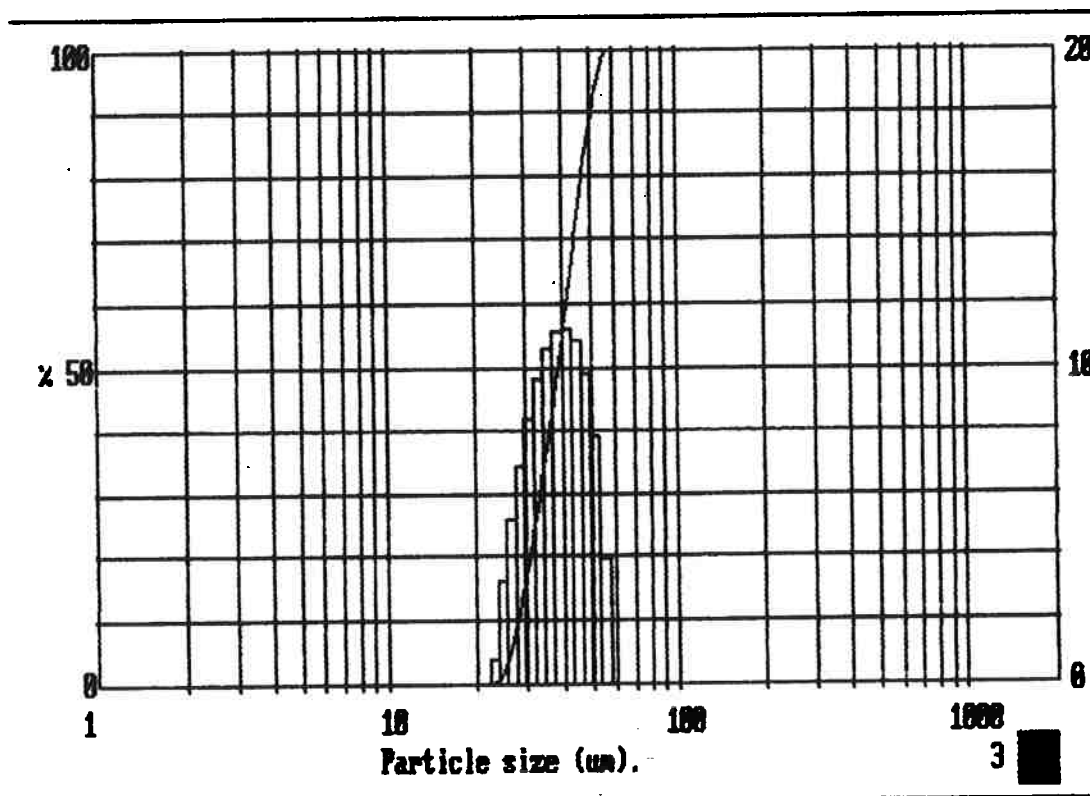


Figura 35: Gráfico de distribuição granulométrica para a pasta RP11 (medição 1).

Tabela 11: Distribuição granulométrica das partículas para a pasta RP11 (medição 2).

Diâmetro(μm)	Porcentagem (%)
57,3	3,7
53,3	7,5
49,5	9,3
46,1	10,4
42,8	10,9
39,8	10,9
37,0	10,6
34,4	9,9
32,0	8,9
29,8	7,5
27,7	5,8
25,8	3,7
24,0	0,9

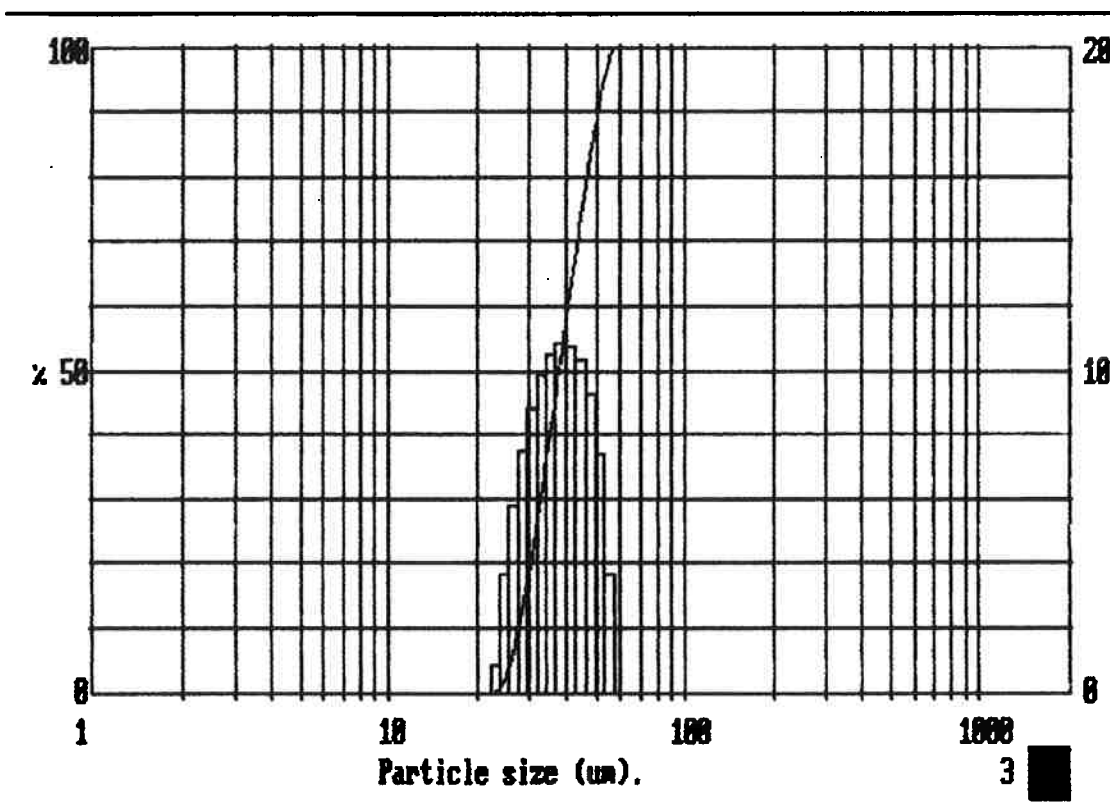


Figura 36: Gráfico de distribuição granulométrica para a pasta RP11 (medição 2).

Nesse caso, observa-se que o diâmetro médio das partículas está em torno de $38\mu\text{m}$.

Comparando-se as distribuições granulométricas obtidas para as duas pastas, nota-se que elas são praticamente iguais. A partir desses dados pode-se discutir que o

processo de obtenção do pó e a sua classificação são bastante controlados e, portanto, não há diferenças nas distribuições granulométricas.

4.3 Ensaio de molhamento

As pastas utilizadas para este ensaio foram as pastas RP 11 e RM 92 não degradadas, a pasta RP 11 degradada durante 109 dias e a pasta RM 92 degradada durante 110 dias.

Após a realização do ensaio foram feitas inspeções visuais, com auxílio de uma lupa, para verificar se houve ocorrência de molhamento, demolhamento ou formação de "solder balls". A Tabela 12 resume os resultados das inspeções feitas nos corpos de prova ensaiados.

Tabela 12: Análise visual das soldas solidificadas após o ensaio.

		Aparência		
		15 s	30 s	45 s
RM92	Não degradada	Não apresenta problemas	Não apresenta problemas	Não apresenta problemas
	Degradada durante 110 dias	Não há remoção total dos óxidos da superfície do cobre e apareceu uma região demolhada. A superfície da solda fica arenosa, junta fria.	Juntas arenosas em todas as deposições e demolhamento em duas.	O mesmo fenômeno que nas moedas oxidadas durante 15 s, mas acontecendo em duas deposições
RP11	Não degradada	Não apresenta problemas	Não apresenta problemas	Não apresenta problemas
	Degradada durante 109 dias	Superfície arenosa em duas deposições.	Superfície arenosa em duas deposições e aparecimento de "solder balls".	Juntas levemente arenosas e ocorrência de demolhamento.

As Figuras 37, 38, 39 apresentam as deposições depois da soldagem.

A Figura 37 apresenta o substrato de cobre oxidado 45 segundos com a pasta RM92 não degradada. A solda solidificada, em um exame visual, não apresenta nenhum problema.

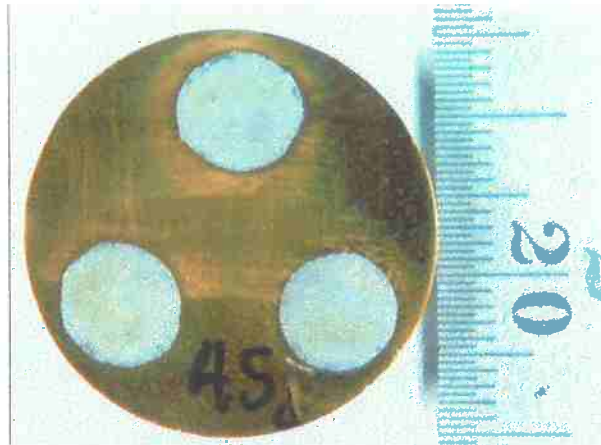


Figura 37: Substrato de cobre oxidado durante 45 s com a pasta RM92 não degradada.

A Figura 38 mostra o substrato de cobre oxidado 15 segundos com a pasta RM92 degradada. Pode-se observar na figura que a superfície apresenta-se arenosa ou rugosa. Isso já foi citado na Revisão Bibliográfica e é conhecido como junta fria. Como foi explicado na revisão bibliográfica pode ter havido uma mudança no comportamento do fluxo da pasta que causou o problema. Além disso, o fluxo não conseguiu retirar todo o óxido da superfície do cobre causando não molhamento em uma pequena área.



Figura 38: Junta fria obtida no ensaio.

A Figura 39 mostra o substrato de cobre oxidado 30 segundos com a pasta RP11 degradada. Nessa amostra, além de ocorrer a formação de junta fria, ocorre a formação de soldas "balls", que são partículas de solda que aglomeram e ficam na periferia da deposição. Essas partículas maiores não se juntam à massa principal prejudicando a continuidade metálica e causando sérios problemas nas propriedades físicas da junta.



Figura 39: Formação de "solder balls" no ensaio.

4.4 Ensaio de espalhamento

As amostras utilizadas para este ensaio foram:

- RM92 não degradada;
- RM92 degradada durante 4 dias;
- RM92 degradada durante 101 dias;
- RM92 degradada durante 160 dias;
- RM92 degradada durante 342 dias;
- RP11 não degradada;
- RP11 degradada durante 4 dias;
- RP11 degradada durante 110 dias;
- RP11 degradada durante 160 dias;
- RP11 degradada durante 342 dias.

As Figuras 40 e 41 mostram o aspecto das deposição da pasta antes do ensaio e depois do ensaio.

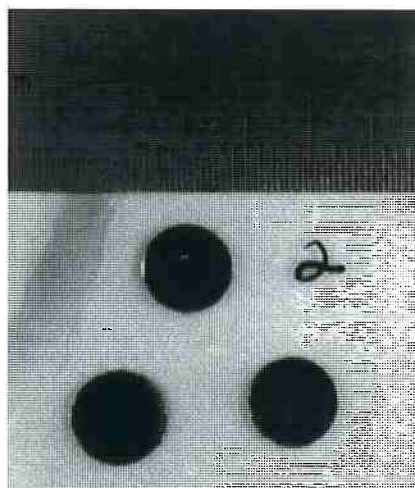


Figura 40: Aspecto das deposições antes do ensaio

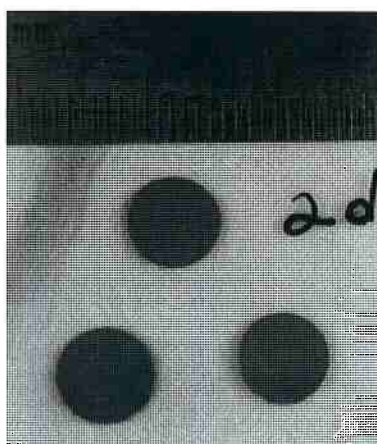


Figura 41: Aspecto das deposições depois do ensaio.

Observa-se que depois do ensaio, as deposições parecem estar "secas". Isso ocorre devido à evaporação dos solventes e um pouco do fluxo.

Identificou-se a deposição superior como A, a inferior à esquerda como B e a inferior à direita como C. As deposições (tanto antes como depois do ensaio) foram medidas na própria fotografia com ajuda de uma lupa que possui uma escala com precisão de 0,05mm. Depois disso, calculou-se a média e o desvio das medidas e, por fim, obteve-se o valor do espalhamento através da fórmula descrita no procedimento. As Tabelas 13 e 14 mostram os resultados obtidos através dessas medidas. Além disso, foram traçados gráficos (Figuras 42 e 43) correspondentes a cada pasta.

Tabela 13: Resultados experimentais para a pasta RM92

	Espalhamento (%)			Média	Desvio
	A	B	C		
RM92 não degradada	0,242	0,228	0,242	0,233	0,006
	0,234	0,227	0,233		
	0,235	0,227	0,231		
RM92 degradada 4dias	0,642	0,647	0,638	0,641	0,005
	0,635	0,646	0,635		
RM92 degradada 101dias	0,92	0,92	0,94	1,0	0,1
	0,88	1,06	1,14		
	1,1	1,1	0,8		
RM92 degradada 160 dias	2,62	2,57	2,75	2,6	0,2
	2,6	2,8	2,3		
	2,4	2,6	2,6		
RM92 degradada 342 dias	2,1	2,0	1,8	2,0	0,1
	2,0	1,9	2,1		
	1,93	----	1,98		

Tabela 14: Resultados experimentais para a pasta RP11

	Espalhamento (%)			Média	Desvio
	A	B	C		
RP11 não degradada		0,342	0,341	0,338	0,006
	0,336	0,342	0,327		
	0,341	0,333	0,339		
RP11 degradada 4 dias	0,652	0,655	0,659	0,656	0,009
	0,664	0,661	0,667		
	0,657	0,639	0,648		
RP11 degradada 110 dias	1,7	1,4	----	1,6	0,2
	1,4	1,8	1,8		
	1,53	----	1,47		
RP11 degradada 160 dias	2,72	2,56	2,58	2,5	0,4
	2,5	2,7	1,9		
	3,0	1,9	2,6		
RP11 degradada 342 dias	2,4	2,1	2,3	2,2	0,2
	2,39	2,47	2,29		
	1,83	1,99	1,97		

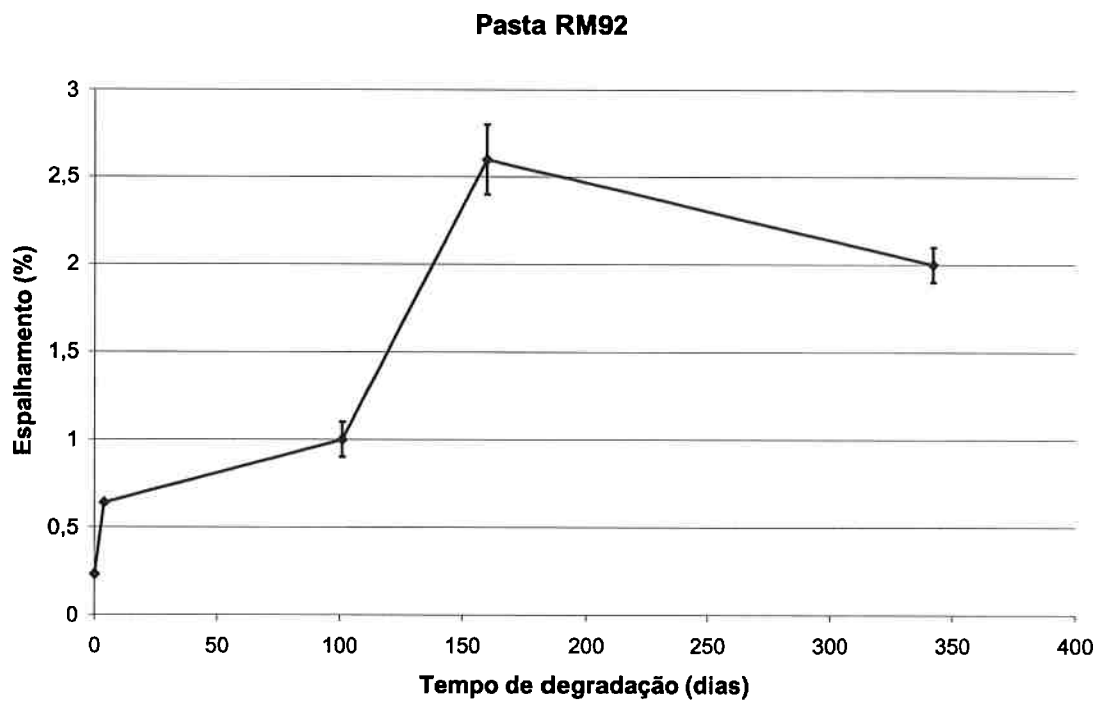


Figura 42: Gráfico espalhamento x tempo de degradação para a pasta RM92

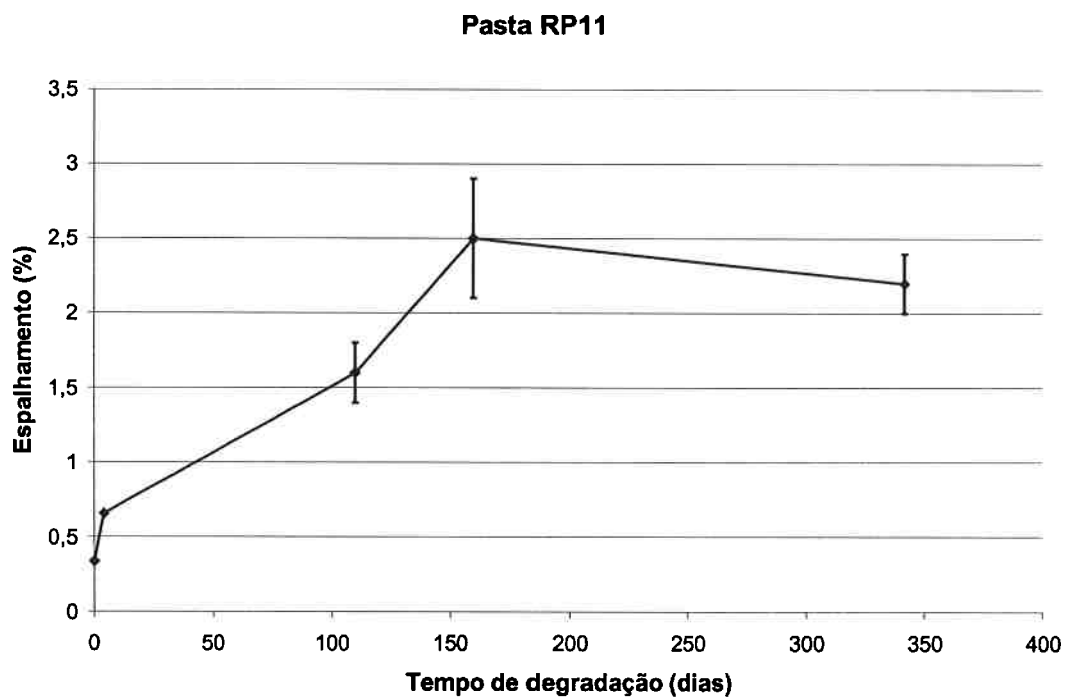


Figura 43: Gráfico espalhamento x tempo de degradação para a pasta RP11

Com os resultados pode-se observar que a degradação da pasta influi bastante no espalhamento da pasta. Comparando-se as os dados obtidos, pode-se afirmar que o espalhamento aumenta com a degradação da pasta.

O aumento do grau de espalhamento pode ser atribuído ao fenômeno de floculação que ocorre em dispersões instáveis. Esse fenômeno corresponde à aglomeração de partículas da dispersão que resulta na decantação desses aglomerados, havendo, assim, uma separação de fase (sólido-líquido). A Figura 44(a) mostra a pasta estável que não apresenta floculação antes do ensaio. Nessa figura as partículas estão homogeneamente distribuídas pelo fluxo (líquido). A Figura 44(b) mostra a deposição de pasta não degradada sobre a placa de vidro depois do ensaio. Como as partículas estão uniformemente distribuídas, a pasta não flui com facilidade, obtendo-se, assim, baixo valor de espalhamento.

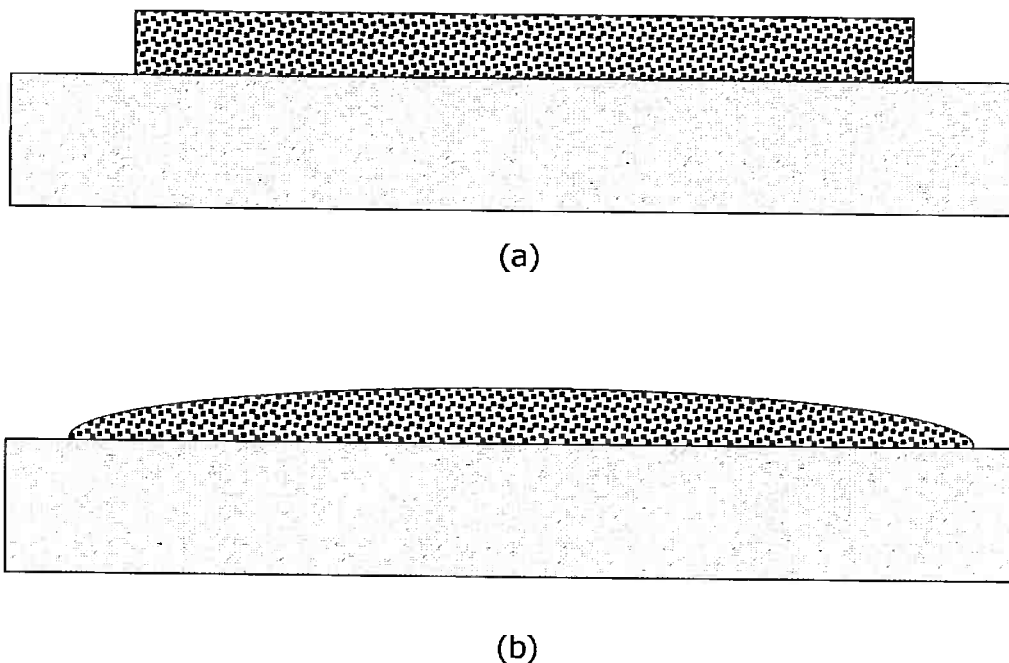
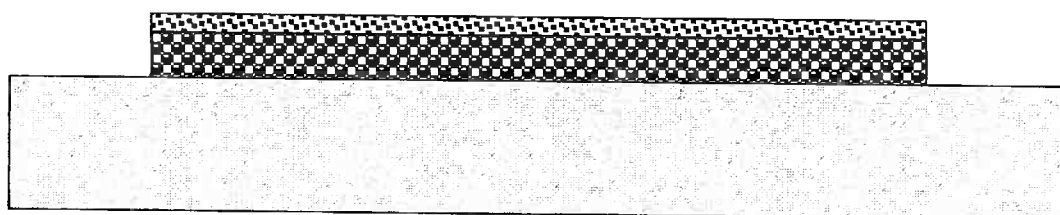
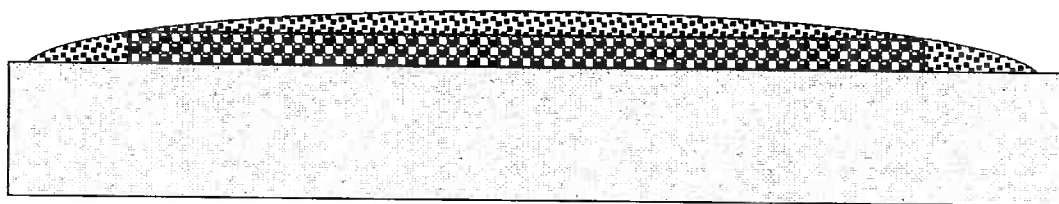


Figura 44: Pasta estável (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio.

Na Figura 45(a) tem-se uma deposição da pasta que apresenta floculação antes do ensaio. A fase líquida se separa da fase mais grosseira e as partículas que não sofreram floculação estão uniformemente distribuídas no líquido sobrenadante. A Figura 45(b) mostra a deposição depois do ensaio. Como a fase líquida possui poucas partículas distribuídas, ela flui com mais facilidade, obtendo-se, dessa forma, alto valor de espalhamento.



(a)



(b)

Figura 45: Pasta instável (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio.

Além do aumento do valor do espalhamento com a degradação da pasta, observa-se também o aumento do valor do desvio padrão. Isso significa que as pastas não degradadas e pouco degradadas são bastante estáveis, ou seja, os valores de espalhamento das deposições assumem valores muito próximos entre si. Já as pastas bastante degradadas são instáveis, pois, além ter um espalhamento maior, esses valores começa a sofrer flutuações. Em outras palavras, as deposições possuem valores de espalhamento distintos entre si. Tudo isso pode ser atribuído à degradação ou formação de componentes na composição do fluxo.

Na área industrial, esse aumento no espalhamento da pasta é bastante indesejável, pois o espalhamento demasiado da pasta na etapa de pré-aquecimento pode causar curto circuito entre os terminais de componentes eletrônicos, prejudicando o funcionamento desses componentes.

4.5 Medição da viscosidade

O ensaio de viscosidade foi realizado para se obter a influência da degradação da pasta para tempos de degradação pequenos (até 40 dias). Esse ensaio foi realizado para as duas pastas, RM92 e RP11, sendo que foram feitas medidas para pastas não degradadas, degradadas por um dia e degradadas por 40 dias.

As Figuras 46 e 47 mostram, respectivamente, os gráficos viscosidade *versus* velocidade de rotação do "spindle" das pastas RM92 e RP11.

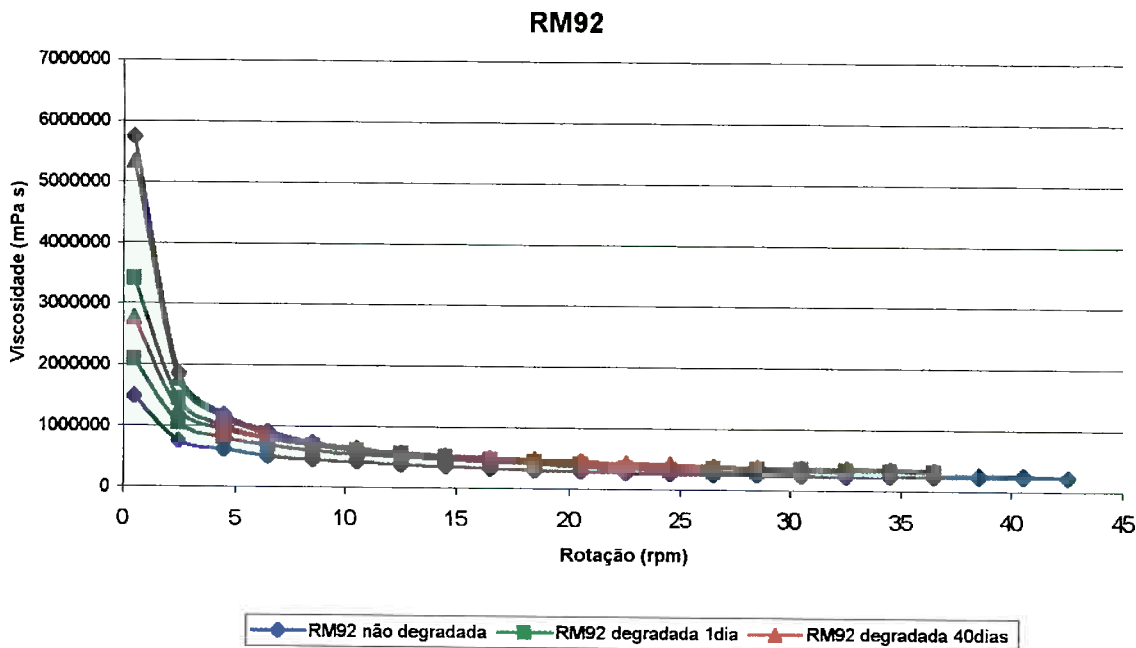


Figura 45: Gráfico viscosidade x rotação para a pasta RM92

Na Figura 46 observa-se que o comportamento da pasta para baixas rotações (entre zero e 5rpm) é bastante complexo quando a pasta se degrada. Observa-se para a curva de "subida" que, em baixas rotações, a viscosidade cai bastante para o tempo de degradação de um dia e, depois, volta a aumentar com o tempo de degradação. A pasta degradada 40 dias possui viscosidade maior que a pasta degradada um dia, porém a viscosidade ainda é menor que a pasta não degradada. Já, na curva de "descida", o comportamento é outro tempo. O tempo de degradação aumenta a viscosidade da pasta em baixas rotações (entre zero e 15 rpm). Em altas rotações (acima de 15 rpm), de um modo geral, não se observa uma influência tão grande da degradação, pois os valores de viscosidade são praticamente iguais.

Na Figura 47 observa-se outro comportamento da pasta em relação à viscosidade. Na curva de "subida", as pastas degradadas durante um dia e 40 dias possuem praticamente o mesmo comportamento reológico e a viscosidade aumenta com a degradação da pasta em baixas rotações do "spindle". Já na curva de "descida", o valor da viscosidade é, praticamente, igual para todas as pastas. Para altas rotações observa-se

o mesmo comportamento da pasta RM92. Os valores da viscosidade, praticamente, não variam com a degradação da pasta nessas velocidades de rotação.

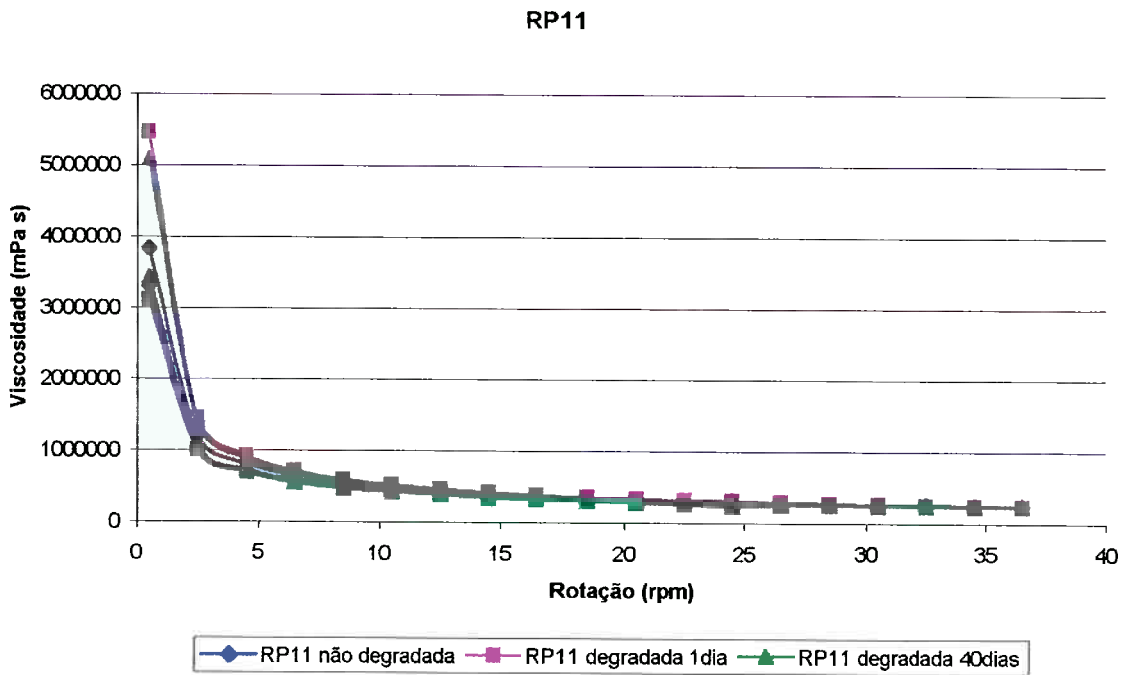


Figura 47: : Gráfico viscosidade x rotação para a pasta RP11

A explicação para a pouco ou nenhuma variação da viscosidade, em altas velocidades de rotação, é que, nessas velocidades, ocorre uma homogeneização na distribuição das partículas metálicas na pasta (perto do spindle). Logo, mesmo que a dispersão esteja floculada, ocorre uma redistribuição das partículas tornando a viscosidade constante para todas as pastas.

Foi visto, em relatórios anteriores, que o aumento da viscosidade com a degradação é devido ao fenômeno da floculação que ocorre em dispersões.

4.6 Observações no MEV

As Figuras 48, 49 e 50, mostram, respectivamente, a amostra padrão de partículas sem a ocorrência de floculação, a amostra da pasta RM92 degradada durante 341 dias e RP11 degradada durante 341 dias.

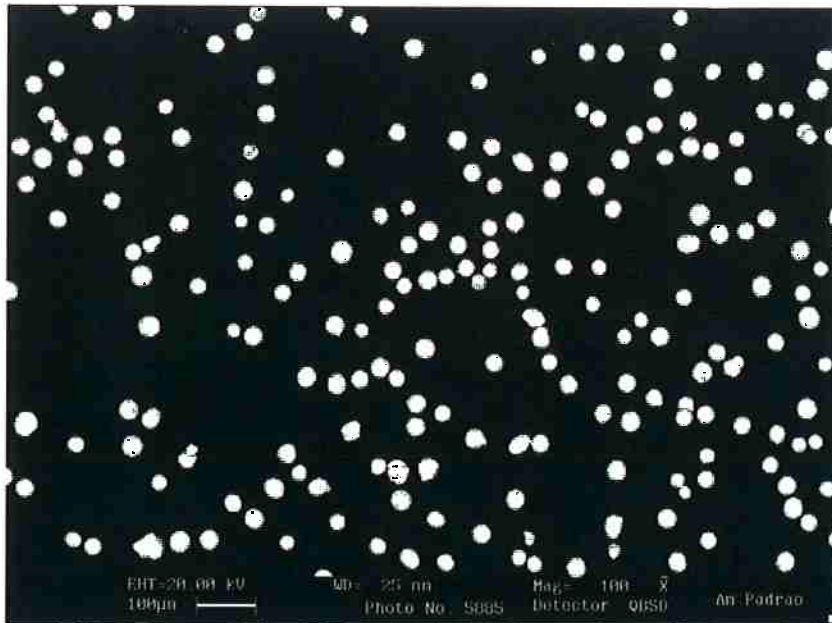


Figura 48: Amostra padrão.

Nota-se na Figura 48 que a amostra padrão não apresenta nenhum tipo de aglomeração de partículas, ou seja, as partículas não se posicionam em locais preferenciais. Isso significa que as partículas estão distribuídas uniformemente e aleatoriamente e que não existe nenhuma interação de forças atrativas ou repulsivas entre as partículas.

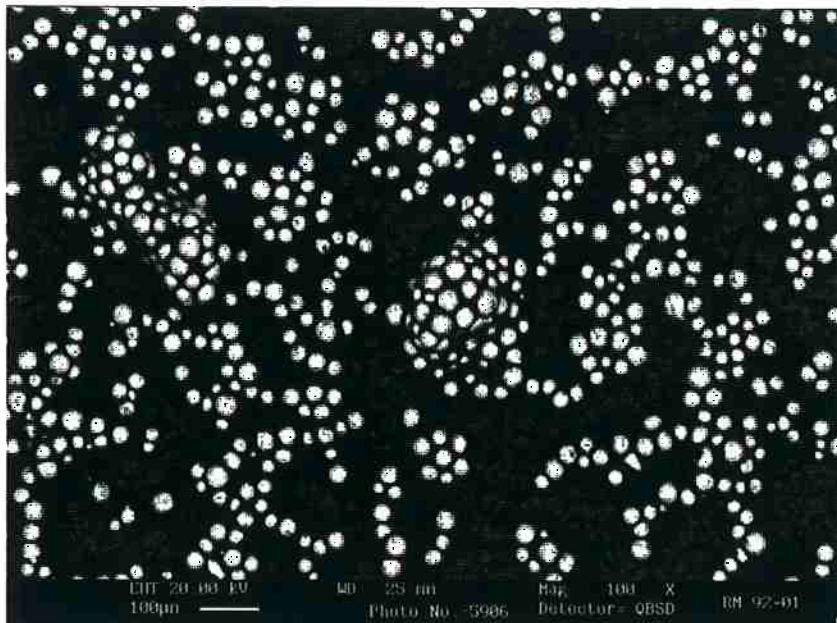


Figura 49: Amostra da pasta RM92 degradada.

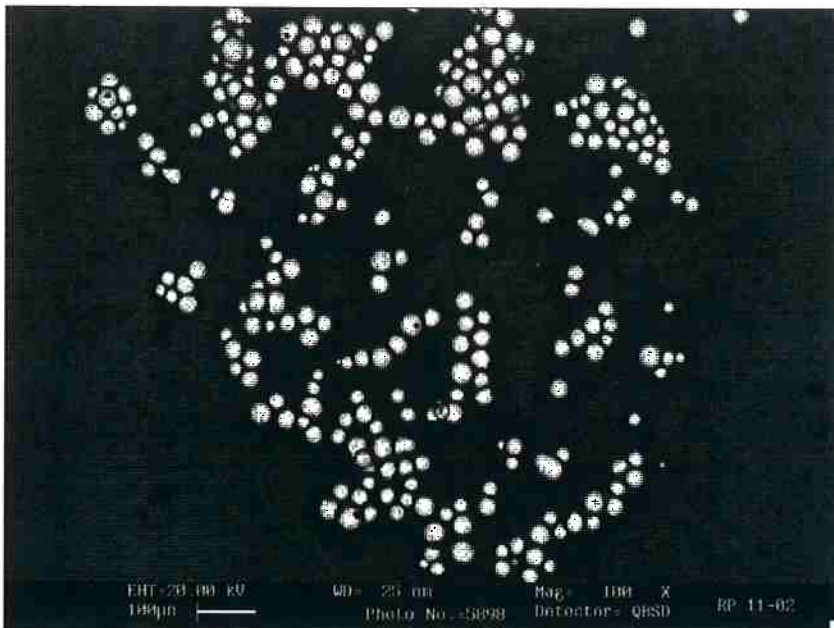


Figura 50: Amostra da amostra RP11 degradada.

Já na Figura 49 (RM92 degradada) observa-se que as partículas estão aglomeradas. Isso indica que a dispersão está apresentando o fenômeno da floculação por causa da degradação do fluxo. Nesse caso, há a formação de aglomerados, pois as partículas metálicas se interagem com forças atrativas. A Figura 50 corresponde a pasta RP11 degradada. Nessa figura, há a formação de aglomerados como na pasta RM92 degradada. Dessa forma, espera-se que, com a degradação, a viscosidade da dispersão aumente como na amostra RM92.

A observação dessas estruturas já era esperada, pois a viscosidade variou com a degradação. Além disso, depois da degradação foi observada, em uma análise visual (a olho nu), uma separação entre a fase sólida e a líquida no recipientes onde o material é conservado.

4.7 Medição do potencial zeta

Foram realizadas algumas medidas no zetâmetro ESA-8000 do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, mas a leitura do valor do potencial zeta variava muito causando uma imprecisão muito grande no ensaio. Se as partículas possuísem uma distribuição fixa de cargas na superfície, ou seja, se não houvesse essa dispersão muito grande nos resultados, poder-se-ia concluir que o mecanismo de floculação é a mudança do potencial zeta.

Portanto os resultados indicam que o mecanismo de floculação da dispersão não é a mudança da distribuição de cargas na superfície das partículas. Mesmo não se conhecendo os compostos que existem na composição da pasta, o mecanismo de floculação que pode ser sugerido para essa situação é o mecanismo estérico mencionado na Revisão Bibliográfica.

4.8 Ensaio de molhamento (Balança de Wilhelmy)

Foram realizados ensaios de molhamento com pastas não degradadas, mas com prazo de validade vencido. A Figura 51 mostra o gráfico força x tempo para várias pastas em condições diferentes.

As amostras ensaiadas foram:

- RP11 não degradada com 209 dias fora da validade;
- RP11 não degradada com 512 dias fora da validade;
- RM92 não degradada com 331 dias fora da validade;
- RM92 não degradada com 109 dias fora da validade;

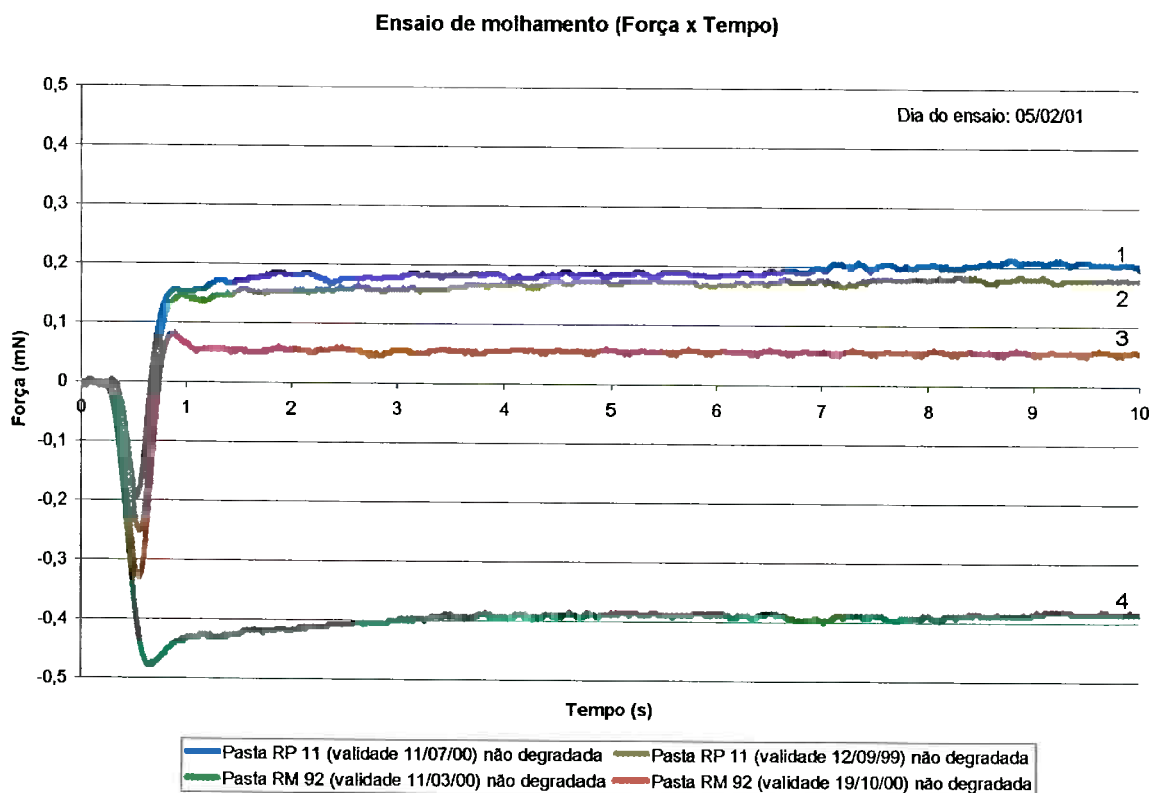


Figura 51: Resultados do ensaio de Wilhelmy

Observa-se que a pasta RP11 (curvas 1 e 2), apesar de possuir prazo de validade menor (6 meses), possui a maior soldabilidade. Além disso a soldabilidade diminui com o tempo em que a pasta esteve fora da data de validade. A maior força para a curva 1 é conferida, pois o ângulo de contato, provavelmente, é o menor de todos. Para pastas que ficaram fora do prazo de validade por mais tempo, ocorreu uma leve degradação do fluxo. A degradação do fluxo prejudica a desoxidação das partículas metálicas, causando o aumento do ângulo de contato (diminuição da soldabilidade).

A pasta RM92 possui uma soldabilidade menor que a pasta RP11 como pode ser observado nas curvas 3 e 4. Como pode ser observado, na curva 3 ocorre o molhamento. Mas a qualidade da junta soldada não seria muito boa, pois o ângulo de contato seria muito alto. A curva 4 é típica de não molhamento devido a alta degradação do fluxo. O fluxo está tão degradado que não ocorre a desoxidação das partículas metálicas prejudicando a soldagem.

O tempo em que ocorre a inversão da curva também serve como parâmetro para avaliar a molhabilidade do metal de adição. Quanto menor o tempo maior a soldabilidade da pasta, pois isso significa que o tempo para ocorrer a junção é pequeno.

As pastas degradadas também foram ensaiadas, mas o fluxo estava tão degradado que o metal líquido não se aglomerava em uma única massa, impedindo o ensaio. As partículas se juntavam em pequenos glóbulos como em um cacho de uvas com o fluxo entre esses glóbulos. Isso ocorreu com todas as pastas degradadas. O tempo de degradação mínimo que existia entre as amostras era de 130 dias.

5. Conclusão

Pode-se concluir, com base na pesquisa, que:

- A fração em massa de metal na pasta é de aproximadamente 90%;
- As distribuições granulométricas das pastas são bastante semelhantes, o diâmetro médio das partículas da pasta RM92 é de 90 μ m e o diâmetro médio das partículas da pasta RP11 é de 38 μ m;
- A qualidade da junta fica bastante prejudicada com a degradação do fluxo e com o grau de oxidação dos corpos de provas, conforme verificado nas inspeções visuais;
- O espalhamento da pasta aumenta com a degradação do fluxo;
- A viscosidade varia com a degradação da pasta;
- Ocorre a floculação da dispersão com a degradação da pasta, conforme verificado na medição da viscosidade e no microscópio eletrônico de varredura;
- A pasta possui comportamento complexo em relação à degradação e viscosidade do fluxo;
- O mecanismo de floculação da dispersão é diferente do mecanismo eletrostático;
- A soldabilidade da pasta diminui com o tempo após o prazo de validade;
- Mesmo possuindo boa soldabilidade após o prazo de validade, a pasta não pode ser utilizada na indústria, pois possui espalhamento excessivo podendo causar curto-circuito entre os terminais do componente eletrônico;
- A soldabilidade da pasta RM92 é menor que a da pasta RP11, apesar de a pasta RM92 possuir prazo de validade maior que a pasta RP11;

6. Referência bibliográfica

- (1) WASSINSK, R.J.K. **Soldering in Eletronics**, 2nd. Edition, Electrochemical Publications Limited, 1989.
- (2) MANKO, H. H.; **Solders and Soldering.**; 2.ed. McGraw-Hill Book Company, 1979
- (3) CAPILLO, C.; **Surface mount technology: materials, processes, and equipment**; McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- (4) THWAITES, C.J.; **Manual de Solda Branda**; International Tin Reserch Institute; I.T.R.I. Publicação N°533P
- (5) Assy, T.M. Mecânica dos fluidos, Ed.Pleiade, São Paulo,1996
- (6) ROOS-KOZEL, B.; Designing Solder Paste Materials to Attach Surface Mounted Devices, **Solid State Technology**, 26(10):173-178, 1983.
- (7) ANJARD, R.P. Quality Solder Paste Systems for Use in Microelectronic Applications, **Solid State Technology**, 26(10):183-189, 1983.
- (8) ZARROW, P. **ASM Handbook**, Vol.6 "Welding, brazing, and soldering.", 3rd.Edition, 1995.
- (9) BRANDI, S.D. – "Brasagem metal / cerâmica : revisão teórica do fenômeno de molhamento e espalhamento". IN: Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, Bento Gonçalves, RS, 20-24 de julho de 1995, pg 479-493.
- (10) TANNER, L.H. The Spreading of Silicone Oil Drops on Horizontal Surfaces, **J.Phys. D: Appl. Phys.**, 12(9): 1473-1484, 1979.
- (11) MILLER, C.A.; RUCKENSTEIN, E. The Origin of Flow During Wetting of Solids, **J.Colloid & Interf.Sci.**, 48(3): 368-373, 1974.
- (12) LOPEZ, J.; MILLER, C.A.; RUCKENSTEIN, E. Spreading Kinetics of Liquid Drop on Solids, **J.Colloid & Interf.Sci.**, 56(3): 460-468, 1976.
- (13) NEOGI, P. MILLER, C.A. Spreading Kinetics of a Drop on a Smooth Solid Surface, **J.Colloid & Interf.Sci.**, 86(2): 525-538, 1982.
- (14) Manual do equipamento MUST SYSTEM II, Multicore inc.
- (15) MAYHEW, A.J.; MONGER, K.S. Solderability by Meniscometry, **Inter.NEPCON**, Chicago, 1972, pg 53-64.
- (16) PANDOLFELLI, V.C. *et al.*, **Dispersão e Empacotamento de Partículas**, Fazendo Arte, São Paulo, 2000