

**ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE
SOLDA BRANDA EM PLACAS DE CIRCUITO
IMPRESSO**

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800004067

SUMÁRIO

1. Histórico
2. Introdução Teórica
 - 2.1. Definição e descrição geral
 - 2.2. Considerações sobre o processo de Solda Branda
 - 2.2.1. Teste de Soldabilidade
 - 2.2.2. Fluxagem
 - 2.2.3. Temperatura
 - 2.2.4. Composição de Solda
 - 2.3. Molhamento
 - 2.3.1. Tensão de superfície entre sólido e líquido - γ_{sl}
 - 2.3.2. Tensão de superfície entre líquido e vapor - γ_{lv}
 - 2.3.3. Tensão de superfície entre sólido e vapor - γ_{sv}
3. Objetivos
4. Parte Experimental
 - 4.1. Armazenamento
 - 4.2. Teste de Soldabilidade
 - 4.3. O processo
 - 4.3.1. Pré-limpeza
 - 4.3.2. Fluxagem
 - 4.3.3. Pré-aquecimento
 - 4.3.4. Solda por onda
 - 4.4. Avaliação da soldagem nas placas montadas
5. Resultados
6. Discussão
7. Conclusão
- Agradecimentos
8. Bibliografia

1. Histórico (1), (2)

Há vinte ou trinta anos quando as válvulas ainda imperavam na eletrônica, os circuitos eram montados sobre chassis de metal junto aos componentes. Essa interligação era feita através de dezenas de fios. Com a vinda dos semicondutores, apareceram as placas de circuito impresso, simplificando em muito a montagem dos circuitos eletrônicos. Na realidade, o circuito impresso já existe há bastante tempo e a maioria dos atuais técnicos engenheiros e hobistas conhecem a sua fabricação até na forma caseira.

As placas são formadas pôr material chamado isolante feito com resina fenólica, fibra de vidro/epoxy ou ainda uma combinação de todos esses materiais, as quais suportam os componentes, nos quais estão os condutores de cobre, que formam o traçado necessário para a perfeita conexão.

As placas de maior quantidade de componentes possuem uma “máscara de solda” que é uma película verde recobrindo o traçado, com exceção das ilhas em que são soldados os componentes. Essa máscara é um material eletricamente isolante que aplicado sobre a superfície, protege os circuitos da deposição indesejada da liga de solda e da agressão térmica e ataque do meio ambiente.

A solda exerce uma importante operação durante a montagem de uma placa de circuito impresso, o funcionamento correto desta depende da interação entre os seus mais variados componentes e o processo de soldagem. Hoje no mundo da solda eletrônica, milhares e milhares de juntas são feitas diariamente, por exemplo:

- um receptor de rádio simples contém aproximadamente 500 juntas soldadas;
- uma TV a cores possui mais ou menos 2000 juntas;

- em alguns microcomputadores podem até chegar ao número de 10^5 de juntas soldadas.

A segurança dessas juntas soldadas é essencial. Enquanto num terreno como o da televisão uma falha resulta principalmente em frustração e aborrecimento, nas áreas profissionais de comunicações ou nas indústrias de defesa ou aéreo espaciais, falhas poderão ter efeitos catastróficos. É necessário portanto que haja uma garantia bastante elevada na qualidade das juntas em cada caso.

2. Introdução Teórica

2.1. Definição e descrição geral (3)

Solda branda é um dos diversos processos de soldagem, que produz coalescência de materiais através do aquecimento destes à temperaturas adequadas, com uso de um metal de enchimento (solda) cuja temperatura liquidus nunca é maior que 450°C e sempre menor que a temperatura solidus dos metais base. A solda fixa-se nas regiões livres da junta por atração capilar.

A ligação entre a solda e o metal base é mais do que adesão ou conexão mecânica apesar destes contribuírem para a resistência da junta. O aspecto principal da junta soldada em solda branda é que um vínculo metálico é produzido pela atração capilar do metal. A solda dissolve (não funde) uma pequena parte do metal base que pode formar uma camada de composição intermetálica. Depois da solidificação a junta é mantida pela mesma atração entre átomos adjacentes que seguram juntos uma parte de metal sólido. A facilidade com que ocorre o molhamento se relaciona com a facilidade com que esta atração se dá.

2.2. Considerações sobre o processo de solda branda

2.2.1. Teste de Soldabilidade (4), (2)

Na operação de soldagem seja ela automática ou manual, existem muitas variáveis. Considerando particularmente operações automáticas do processo de soldagem, é absolutamente essencial que todos os conjuntos entregues à linha de produção de sejam molhados pela solda em tempo mínimo. Para se ter segurança que a operação produzirá juntas o mais próximo possível de 100% perfeitas, deve-se sempre que possível, executar testes de soldabilidade dos componentes, imediatamente antes de serem soldados.

É impraticável testar cada componente individualmente para soldabilidade de forma que um esquema de rotina de amostragem deve ser usado a fim de obter um resultado representativo, os testes de soldabilidade são executados usualmente em amostras selecionadas antes de serem montadas. Porém qualquer demora longa entre a montagem e o processo de soldagem pode causar deterioração na soldabilidade, particularmente onde o acabamento da superfície não é satisfatório.

É claro que em qualquer teste é necessário estabelecer-se no começo, quais níveis de soldabilidade, determinados pelo teste, representam uma qualidade aceitável para a obtenção de bons resultados na linha de produção.

O uso regular dos testes nas placas de circuito impresso concorre muito (de maneira indireta) para evitar soldagem defeituosa na linha. Dessa forma, soldagem defeituosa devido à materiais de má qualidade pode ser evitada em vez de se ter que localizar e reparar juntas de qualidade inferior.

A soldabilidade pode ser determinada usando-se o fluxo e as condições de temperatura existentes na linha de produção para alcançar alguma correlação

direta entre o tempo de molhagem em produção e sob condições de teste. É melhor prática porém, fazer testes de soldabilidade com as temperaturas mais baixas possíveis usando-se um fluxo de resina não ativado. A soldabilidade é assim estimada sob as condições menos favoráveis possíveis. Isso é uma garantia de que se o teste for aprovado, a soldagem na linha de produção não apresentará qualquer problema.

2.2.2. Fluxos para o processo de solda branda (4), (5)

O fluxo a ser usado depende na maioria das vezes do tipo de equipamento que está sendo soldado. Fluxos líquidos usados em solda branda podem ser apresentados em três categorias: corrosivos (ácidos), intermediários (orgânicos), e não corrosivos (base de resina). Embora as duas primeiras classes de fluxos possam ocasionalmente ser usadas na indústria elétrica e eletrônica com a finalidade de pré-revestimento ou em trabalho de montagem de chapa metálica, são pouco usadas na junção final do equipamento eletrônico. Fluxos corrosivos a base de água, ou os orgânicos, são usados em pequena escala até, na soldagem em circuito impresso, principalmente nos Estados Unidos, o que naturalmente permite a realização da soldagem quando a preparação da superfície for a mínima possível, porém requer lavagem completa após a operação de soldagem. Isto somente pode ser efetuado, por conseguinte, se todos os componentes usados no conjunto são resistentes à imersão em água quente. Para a maioria dos trabalhos de conjuntos, porém, fluxos à base de resina são usados quase que exclusivamente, porque os resíduos não são corrosivos.

Fluxos de resina comuns, conquanto sejam os mais seguros do ponto de vista de corrosão, requerem que as superfícies a serem soldadas tenham o mais

elevado nível de limpeza. Devido à dificuldades de se atingir essa meta sob condições de produção, são utilizados fluxos de resina ativada contendo pequenas quantidades de substâncias, tais como haletos orgânicos, e que possuem uma atividade substancialmente mais elevada do que as resinas puras. A maioria dos países tem padrões projetados para limitar a quantidade do ativador adicionado à resina, de forma que até sob condições de trabalho desfavoráveis, os resíduos do fluxo não causam corrosão ou degradação de isolamentos elétricos.

O revestimento de fluxo sobre a placa de circuito é geralmente aquecido para remover o excesso do solvente do fluxo antes da soldagem. Nos casos em que a soldagem é conduzida como em onda, cascata ou vertedouro, as placas de circuito podem passar sobre aquecedores infravermelhos controlados ou sopradores de ar quente, para remover alguns dos solventes voláteis da camada do fluxo. Se isso não for feito, grandes volumes de gases podem ser formados durante a soldagem, e aprisionados debaixo de uma placa horizontal, resultando em áreas que não foram molhadas pela solda líquida.

2.2.3. Temperatura (4)

A temperatura de soldar é freqüentemente na região dos 240 a 260°C e tendo-se componentes com boa soldabilidade, molhamento completo e enchimento das juntas deverá ser conseguido em poucos segundos. Obviamente isso até certo ponto depende da massa térmica do conjunto em particular. Temperaturas mais elevadas e tempo mais longo podem causar dificuldades devido à distorção das placas de circuito impresso ou deterioração dos componentes eletrônicos montados na face superior da mesma. Trabalhos prévios

na linha de produção podem estabelecer o relacionamento entre temperatura e percentagem de juntas soldadas com imperfeições.

2.2.4. Composição do metal de adição (4), (1)

Existe um certo grau de tolerância na composição da solda usada num processo automático como o de soldagem por onda: uma solda de 60% Sn pode funcionar bem com o conteúdo de Sn talvez um pouco mais baixo. Da maior importância, porém é o efeito das impurezas no banho de solda e o Tin Research Institute estudou o efeito de diferentes impurezas nas propriedades de molhamento e demolhamento de soldas 60/40 (60% Sn e 40% Pb).

Os resultados publicados mostram que adições individuais abaixo de 0,0005 -0,001% de alumínio (Al) e 0,005 de Zinco (Zn) não produzem nenhum efeito prejudicial ao molhamento. Acima desses níveis, filmes de óxidos visíveis se formam rapidamente sobre a superfície de um banho estático de solda, e a 0,01% Zn produz-se a demolhamento de uma superfície de cobre quando se usa fluxos de resina. Com conteúdos mais elevados de Zn o espalhamento de uma gota líquida de solda sobre o cobre foi reduzido e também partículas de detritos apareceram suspensas na solda.

Adições de Fósforo (P) a um banho de 60/40 num nível de 0,01% produziu certa rugosidade e o começo de demolhamento sobre o cobre. Enxofre (S) é um elemento considerado freqüentemente como indesejável nas soldas, porém verificou-se que é difícil introduzir-se muito desse elemento num banho de 60% de Sn a temperaturas baixas. Foi verificado que um nível de 0,002% S produziu revestimentos de solda muito rugosos sobre Cu devido à sulfatos em suspensão. Nem P e nem S devem estar presentes em lingotes de solda de boa qualidade.

No caso dos elementos mais comuns já presentes num banho de solda 60/40 ou que podem ser introduzidos durante a soldagem, Cu e Sb não têm efeitos que se pode notar sobre molhamento, demolhamento ou sobre oxidação da liga até 0,5% . Além disso, num processo de soldagem por onda é comumente notado que o conteúdo de Cu sobe para um nível de 0,3 ou 0,4% e permanece estável. Uma mudança no conteúdo de Sb de 0 a cerca de 0,1% produz redução notável no espalhamento da solda, porém acima desse nível não apresenta maior mudança.

2.3. Molhamento (6), (7)

O molhamento é um fenômeno fascinante, sem dúvida porque não é completamente compreendido, sendo para a junta soldada uma etapa fundamental. Numa visão clássica, sem outras reações ocorrendo, uma gota líquida de uma liga com baixo ponto de fusão (a solda) vai fluir sobre a superfície de um metal com ponto de fusão mais alto (metal base). Isto ocorre devido ao abaixamento na energia livre do sistema pela redução na energia livre de superfície.

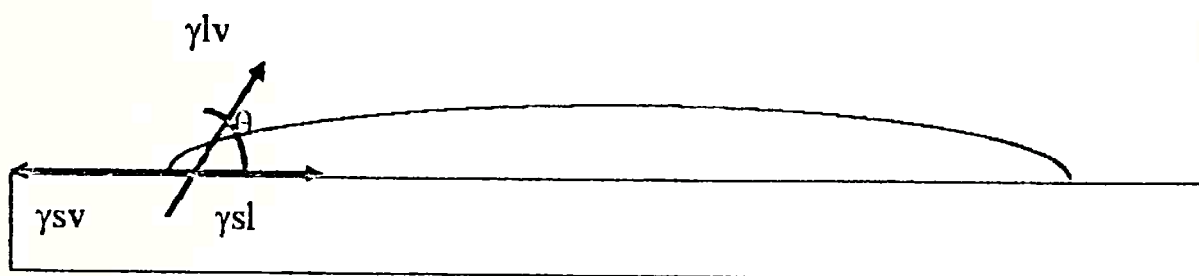
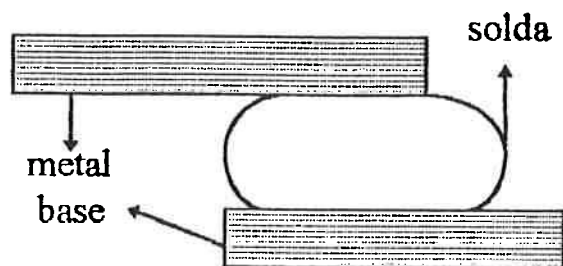
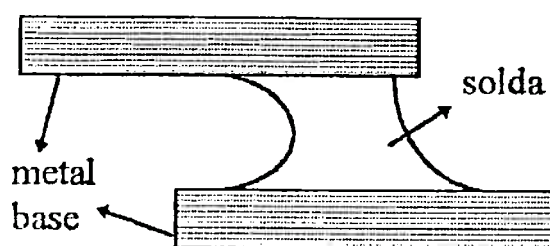


Figura 1- Tensões de superfície na gota de solda

espalhamento também ocorre quando a superfície do líquido cresce a um máximo, mesmo se θ for maior que 0° (b). A taxa de espalhamento está diretamente relacionada com a inércia do líquido e sua viscosidade.



(a)



(b)

Figura 2 - (a) molhamento; (b) demolhamento

Na equação (1), $\gamma_{lv} \cos \theta$ pode ser considerado como uma força de resistência que se opõe a que o líquido molhe o sólido e $(\gamma_{sv} - \gamma_{sl})$ é uma força a favor da molhagem. Sendo $\gamma_{lv} \cos \theta$ maior que $(\gamma_{sv} - \gamma_{sl})$, não ocorrerá molhagem nem espalhamento. É importante portanto diminuir o valor $\gamma_{lv} \cos \theta$ ou aumentar

A molhabilidade é uma característica da superfície e esta relacionada com o balanceamento das tensões de superfície entre o sólido e o líquido γ_{sl} , o sólido e o vapor γ_{sv} e o líquido com o vapor γ_{lv} .

O ângulo de contato θ entre o sólido e o líquido é definido em condições de equilíbrio como o ângulo entre os vetores que representam a tensão de superfície líquido-vapor e a do sólido-líquido. A relação entre o ângulo de contato e as tensões de superfície é dada pela equação de "Young ~~XXXXXX~~":

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (01)$$

$$\gamma_{lv} \cos \theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl}$$

$$\cos \theta = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) / \gamma_{lv}$$

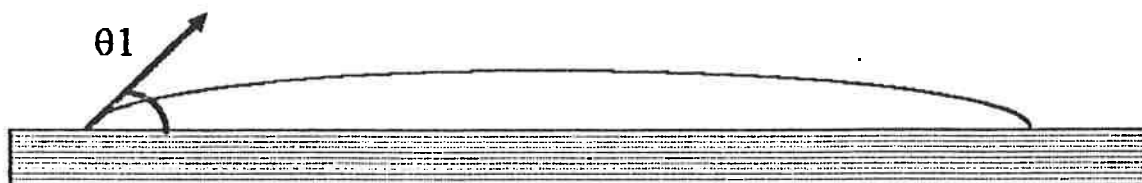
Diz-se que um líquido molha um sólido quando o ângulo de contato θ é menor que 90° . Neste caso sendo γ_{lv} constante pode-se concluir que γ_{sv} deve ser maior que γ_{sl} ($0 < \cos \theta < 1$). Por outro lado se γ_{sv} for menor que γ_{sl} , θ será maior que 90° e o líquido não irá molhar o sólido.

A figuras 2 ilustra um caso onde houve molhamento (a) e um outro onde não houve (b), em nenhum deles houve reação de formação de uma camada intermetálica entre o sólido e o líquido.

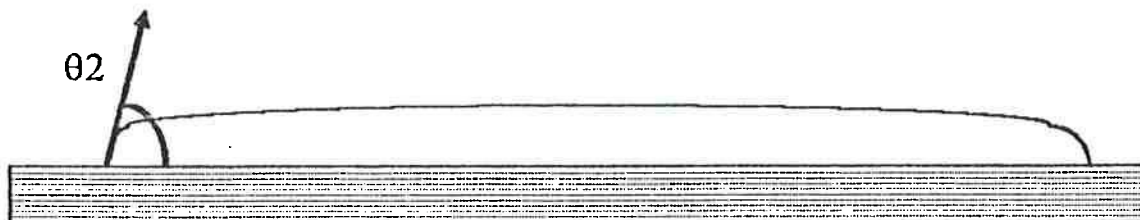
O espalhamento é um processo dinâmico relacionado com o ângulo de contato e pode ser descrito como um aumento na superfície de líquido e na área da interface, ao longo do tempo.

Conforme a figura 3, diz-se que houve espalhamento total de um líquido sobre a superfície de um sólido quando o ângulo de contato tende a 0° (a). O

($\gamma_{sv} - \gamma_{sl}$) trabalhando com as variáveis mais importantes que são o pré-aquecimento, a pré-limpeza, o fluxo, a atmosfera, o metal de adição e outros.



(a)



(b)

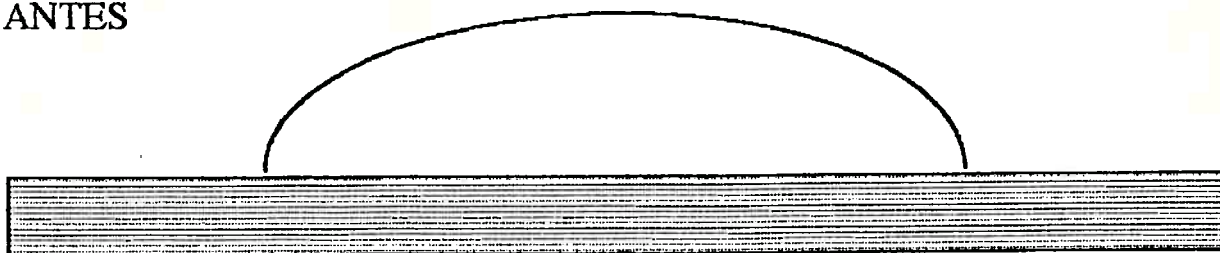
Figura 3 - Espalhamento

2.3.1. Tensão de superfície entre sólido e líquido - γ_{sl}

Pode acontecer de durante o processo a solda reagir com o metal base formando uma camada intermetálica que terá sua composição definida pelos elementos presentes no líquido e no sólido e pelas condições de processamento.

Com a formação desta camada intermetálica o γ_{sl} pode mudar e teremos, conforme a equação (1), a figura 4 representando um momento antes da formação do intermetálico e dois momentos depois, um para cada situação.

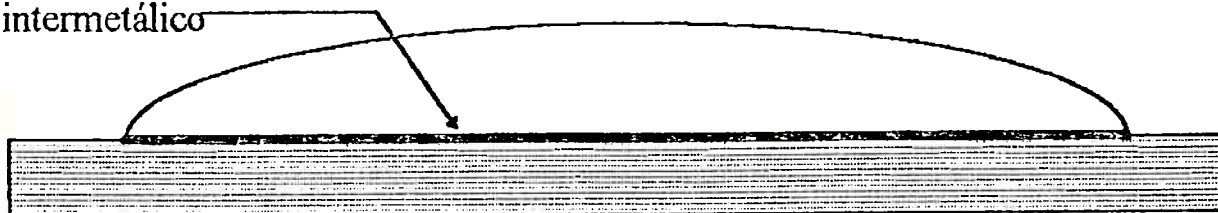
ANTES



(a)

DEPOIS

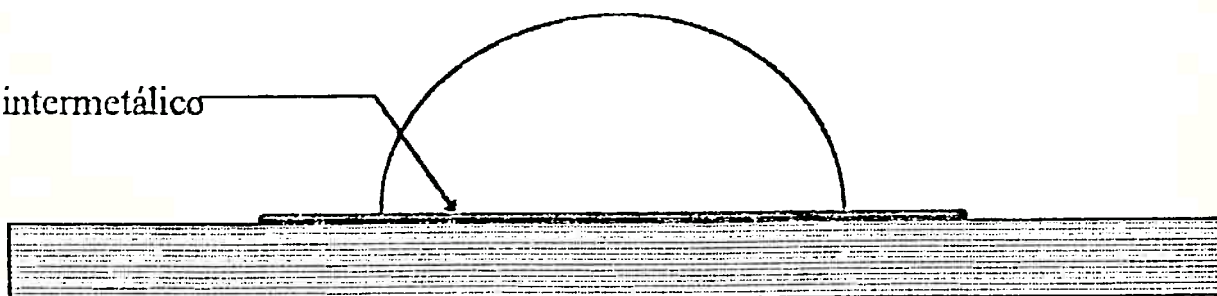
intermetálico



$$(b) \gamma_{sl} \text{ antes} > \gamma_{sl} \text{ depois} \Rightarrow \cos \theta \text{ antes} < \cos \theta \text{ depois}$$

DEPOIS

intermetálico



$$(c) \gamma_{sl} \text{ antes} < \gamma_{sl} \text{ depois} \Rightarrow \cos \theta \text{ antes} > \cos \theta \text{ depois}$$

Figura 4 - Efeito do intermetálico (a) antes, (b) e (c) depois

Fica evidente que são vantajosas as condições que propiciam a formação de um intermetálico que se encaixe na situação representada na figura 4 (b), pois ter-se-á ao mesmo tempo o molhamento e o espalhamento da solda líquida sobre o substrato.

2.3.2. Tensão de superfície entre líquido e vapor - γ_{lv}

A variação na tensão líquido vapor pode estar relacionada com a segregação de alguns constituintes da gota de solda. Existem tratamentos termodinâmicos que prevêm a segregação de elementos baseados na energia de superfície de cada elemento. Assim, se a energia de superfície do elemento B for menor que a do elemento A, haverá uma grande concentração de B próximo da interface líquido vapor. Dessa maneira o γ_{lv} pode ser diminuído, favorecendo o molhamento. A figura 5 ilustra esquematicamente o exposto acima.

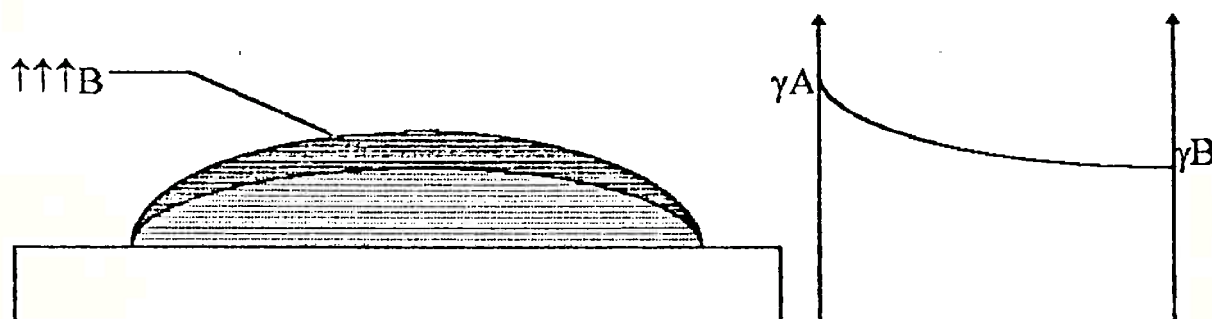


Figura 5 - Efeito da segregação

2.3.3. Tensão sólido vapor - γ_{sv}

A energia de superfície sólido-vapor pode ser modificada pela adsorção de substâncias na superfície ou pela formação de um produto de reação.

A formação de óxidos na superfície é o caso mais típico de produtos de reação na superfície e está retratada na figura 6. A formação da camada de óxido é tanto mais rápida quanto maior for a afinidade do elemento pelo oxigênio. Da mesma maneira, a camada de óxido cresce proporcional a uma potência de tempo.

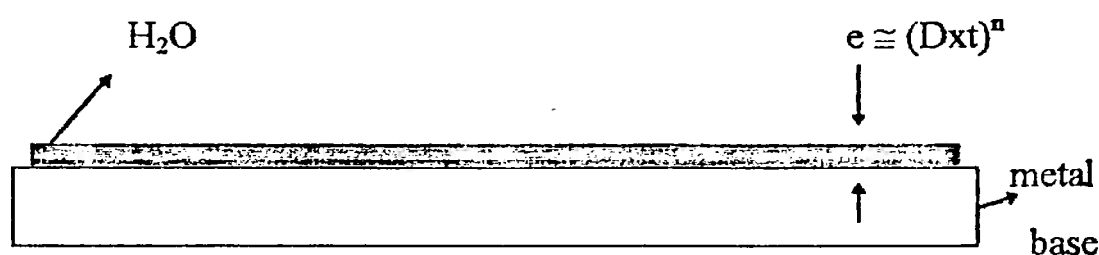


Figura 7 - Efeito dos produtos de reação

3. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo estabelecer as condições que propiciam alta produtividade no processo de solda branda através do estudo da influência dos meios de pré-limpeza, temperatura de pré-aquecimento e tempo de armazenamento das placas de circuito impresso.

Objetivou-se também testar a eficiência da implantação do teste de soldabilidade na linha de montagem como garantia de aprovação final das placas.

4. Parte Experimental (8)

Uma abordagem que facilita a identificação das variáveis independentes em determinado processo é o uso de um diagrama Ishikawa. Este diagrama, também

conhecido como gráfico de causa e efeito ou espinha de peixe é uma representação gráfica que mostra as causas potenciais de um problema.

O gráfico é arranjado com o problema ou aquilo que se quer estudar no eixo horizontal com linhas colocadas em ângulo como raios ou degraus. A estes raios são associadas as categorias das causas e cada degrau tem uma série de causas específicas relacionadas com cada categoria.

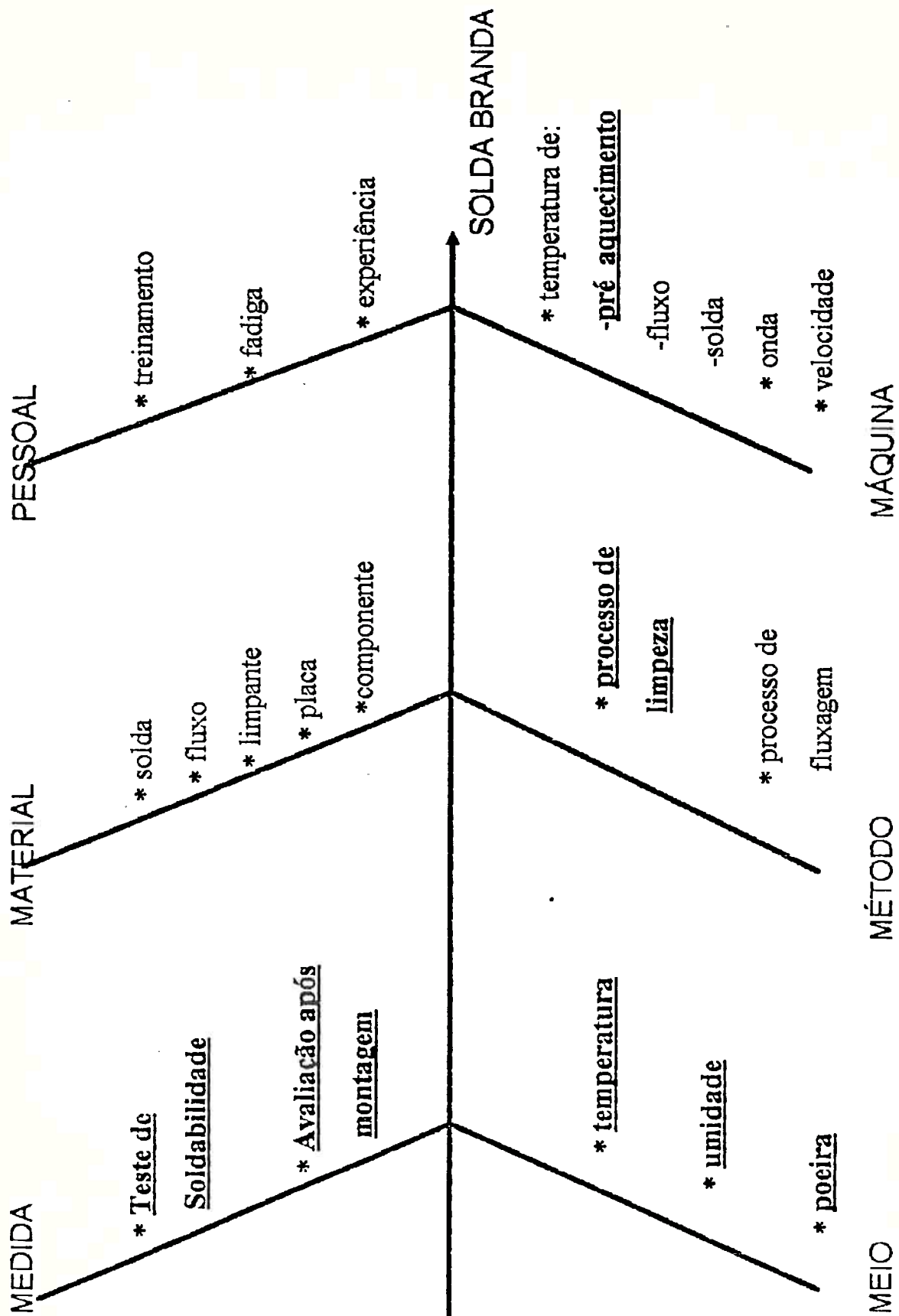
Este diagrama é uma ferramenta auxiliar no diagnóstico de problemas que representa a relação entre um determinado efeito e suas prováveis causas. Montou-se um Ishikawa do processo de solda branda que está ilustrado na figura 7.

Neste trabalho foram estudados os itens meio, medida método e maquina que serão abordados nos próximos tópicos.

4.1. Armazenamento (meio)

Tanto os componentes como as placas de circuito impresso eram fornecidas por fornecedores de empresas diversas e eram estocadas em caixas plásticas tampadas, às condições ambientes por intervalos de tempo que variaram entre 10, 20 e 30 dias. Durante os ensaios ambos eram armazenados em caixas plásticas sem tampa aguardando a montagem, cada ensaio levava em média 7,5 horas (1 turno).

Figura 7 - Ishikawa



4.2. Teste de Soldabilidade (medida)

Cada ensaio correspondeu a cinco lotes de material (placas e componentes) e de cada lote eram retiradas $n \times 6$ amostras para serem testadas. Os testes eram feitos n vezes, cada um com 6 placas, n era definido com base no número de placas a serem montadas, a cada 100 placas 1 teste.

Os testes de Soldabilidade foram realizados nas placas de circuito impresso sem os componentes, portanto nas trilhas de Cobre. Estas eram adaptadas ao transportador e submetidas ao processo de soldagem sob as mesmas condições de ensaio. Eram examinadas posteriormente no laboratório com o auxílio de uma lupa e comparadas com uma placa padrão. As figuras 8 e 9 ilustram exemplos de uma placa aprovada e uma reprovada

Com base no número de placas montadas por ensaio foi levantada a porcentagem das placas que foram aprovadas no teste. A seguir é mostrado um exemplo que ilustra o cálculo feito em cada ensaio:

placas montadas = 724

$\Rightarrow 1^\circ$ teste - 1 placa reprovada

$\Rightarrow 2^\circ$ teste - 0 placas reprovadas

$\Rightarrow 3^\circ$ teste - 0 placas reprovadas

$\Rightarrow 4^\circ$ teste - 1 placa reprovada

$\Rightarrow 5^\circ$ teste - 0 placas reprovadas

$\Rightarrow 6^\circ$ teste - 2 placas reprovadas

$\Rightarrow 7^\circ$ teste - 0 placas reprovadas

4 placas reprovadas em 42 $\Rightarrow$ 69 em 724

$\therefore 9,5\%$ de reprovação $\Rightarrow 90,5\%$ de aprovação



Figura 8 - Trilha aprovada no teste de soldabilidade

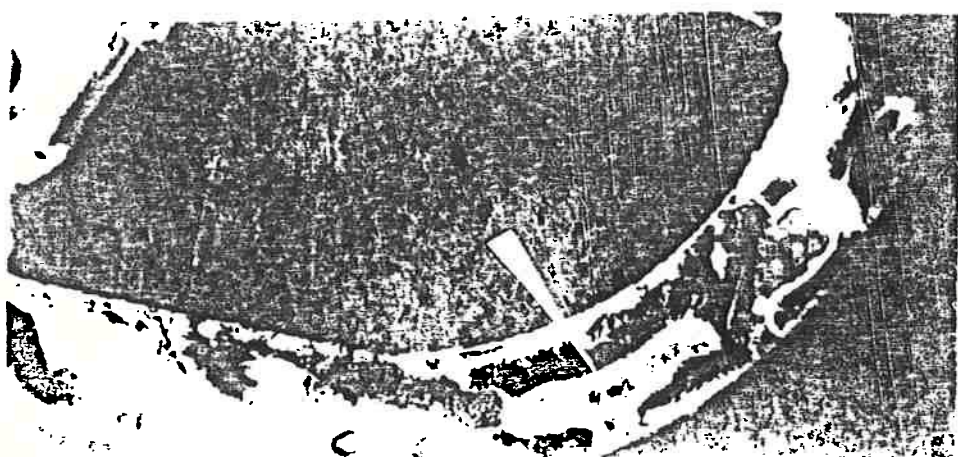


Figura 9 - Trilha reprovada no teste de soldabilidade

4.3. O processo

As placas com os componentes a serem soldados são encaixadas no transportador e este na esteira, desta forma as placas vão passando sucessivamente pela limpeza, fluxagem, pré-aquecimento e a soldagem propriamente dita. Não foi alterada nenhuma variável, que não as explicitadas, durante todo o tempo dos ensaios.

4.3.1. Pré-limpeza (método)

Para pré-limpeza foram utilizados duas substâncias, o álcool etílico industrial (não diluído) e um solvente clorado, o percloroetileno. A limpeza era feita com a passagem do transportador sobre uma espécie de esponja embebida em álcool ou solvente.

4.3.2. Fluxagem (método)

Na câmara de fluxagem por onda trabalhou-se com fluxo de resina ativada aquecido a uma temperatura de 220°C.

4.2.3. Temperatura de pré aquecimento (máquina)

As placas e componentes foram pré aquecidas em câmaras de infravermelho nas temperaturas de 60, 70, 75, 80, 85, 90, 100, 110, 120 e 130°C. É interessante notar que esta era a temperatura de regulação da máquina o que não corresponde exatamente à temperatura da placa.

4.3.4. Solda por onda (máquina)

Neste processo a solda é bombeada através de um rasgo estreito para produzir uma onda estática sobre a crista da qual passa a placa de circuito impresso por meio de um transportador. Trabalhou-se com a solda 63/37 à 270°C.

Após passar pela onda de solda o transportador é desencaixado da esteira automaticamente e as placas resfriam à temperatura ambiente, depois de frias as placas são inspecionadas e são separadas as que apresentam defeitos visíveis a olho nu. Em seguida cada placa é testada e separam-se as aprovadas das reprovadas.

4.3. Avaliação da soldagem nas placas montadas (medida)

Após a soldagem é necessário verificar se houve molhamento em cada junção, isto é feito através da avaliação das propriedades elétricas da placa, quando há conformidade com os valores pré estabelecidos conclui-se que a junção está perfeita, ou seja, houve molhamento.

Com base no número total de placas processadas calcula-se a porcentagem destas que foram aprovadas. As figuras 10, 11, 12 e 13 ilustram dois exemplos de terminais com bons ângulos de molhamento e outros dois defeituosos, somente os dois primeiros foram aprovados.



Figura 10 - Placa aprovada, bom molhamento

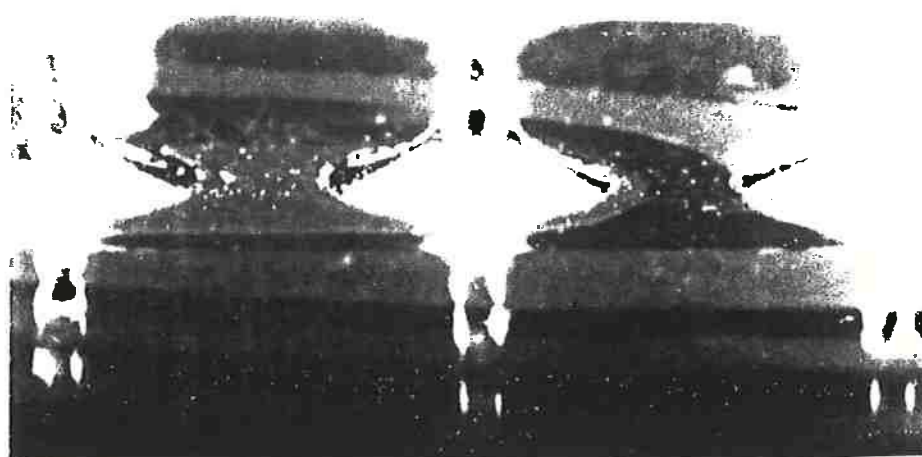


Figura 11 - Placa aprovada, bom molhamento



Figura 12 - Placa reprovada, molhamento insuficiente

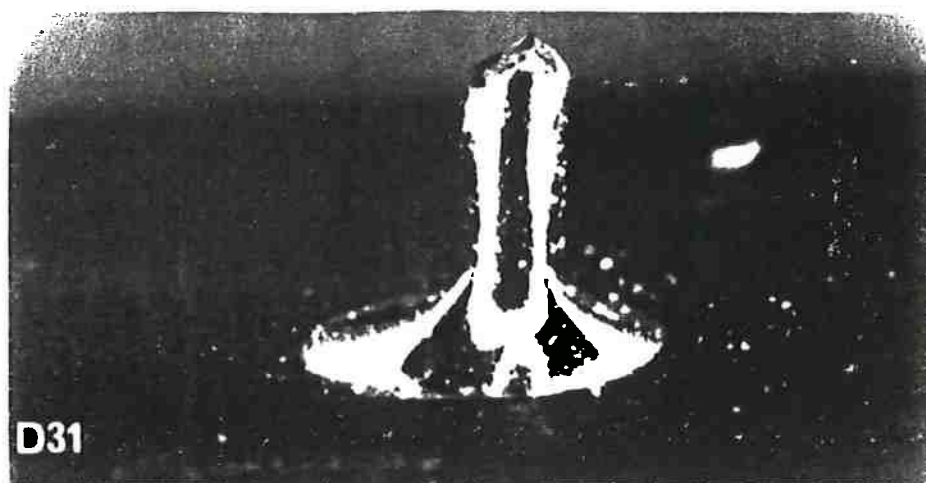


Figura 13 - Placa reprovada, molhamento insuficiente

5. Resultados

As tabelas de dados e de testes estatísticos foram agrupadas no anexo 1 e os gráficos estão no anexo 2.

A tabela 1 mostra os resultados obtidos no teste de soldabilidade sobre as trilhas de cobre das placas de circuito impresso.

A tabela 2 mostra os resultados dos ensaios realizados nas placas com os componentes, ou seja, o resultado da soldagem no par Sn/Cu.

O gráfico 1 representa a fração de placas aprovadas no teste de soldabilidade para os 3 tempos de estocagem quando da utilização dos três meios de pré limpeza. Observa-se que quando não houve pré limpeza a taxa de reprovação é bastante elevada e cresce para tempos de estocagem crescente. O álcool apresenta resultados intermediários entre o solvente clorado e a falta de pré limpeza.

Os gráficos 2, 3 e 4 representam a fração reprovada em função do tempo de estocagem no teste de soldabilidade para nenhuma pré-limpeza, limpeza com álcool etílico e com solvente clorado respectivamente. Neste gráfico colocou-se também uma curva do tipo:

$$\text{Fração reprovada} = K \cdot \text{tempo}^{1/2}$$

onde K é a constante que fornece a curva mais próxima da curva experimental para cada meio de pré-limpeza. Foi necessário o uso de escalas diferentes em cada caso mais pode-se observar que a constante do solvente clorado é a menor.

Nos gráficos 5, 6 e 7 foram plotadas as porcentagens de placas aprovadas em 10, 20 ou 30 dias de armazenamento para cada temperatura,

sendo o 5° sem pré-limpeza, o 6° pré-limpeza com álcool e o 7° com solvente clorado. Observa-se nestes gráficos que o álcool fornece os melhores resultados, a falta de limpeza mostra um rendimento crescente com a temperatura efeito também percebido para o solvente clorado, já o álcool parece ter uma tendência de máximo em temperaturas próximas de 85°C.

Os gráficos 8,9,10 e 11 representam de forma diferente os mesmos valores plotados nos gráficos 5,6 e 7, fixou-se nestes a temperatura e foram traçadas para cada meio de pré-limpeza uma curva da fração aprovada versus tempo de estocagem.

Confirmando os outros gráficos, o álcool aparece nestes como melhor meio de pré-limpeza para todas temperaturas, tendo seu máximo desempenho entre 80 e 100°C. Tanto o solvente clorado como a falta de pré-limpeza tiveram uma menor reprovação para temperaturas mais elevadas, apresentando ambos um máximo na temperatura de 120°C. Observa-se ainda que o efeito do tempo de armazenamento só é sentido quando não há pré-limpeza.

Foram realizados testes estatísticos nos valores tabelados na tabela 2 e os resultados deste teste estão nas tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

As tabelas 3 e 4 mostram que para nenhuma pré-limpeza não existe diferença significativa entre as médias tanto para as diversas temperaturas de pré-aquecimento quanto para os tempos de armazenamento.

Nas tabelas 5 e 6 vemos que quando a pré-limpeza é feita com álcool etílico existe diferença significativa entre as temperaturas de pré-aquecimento mas o mesmo não acontece para os tempos de armazenamento.

Finalmente nas tabelas 7 e 8 o teste estatístico mostra que para o solvente clorado também não há diferença entre os valores obtidos nos diferentes tempos de armazenamento, só há diferença entre as temperaturas de pré-aquecimento.

6. Discussão

Os resultados obtidos no teste de soldabilidade mostram que o solvente clorado é o mais efetivo dos meios de pré-limpeza, ou seja, sob seu efeito o molhamento da superfície é bem melhor. Quando não houve pré-limpeza a aprovação caiu consideravelmente para tempos de armazenamento crescentes e álcool teve um comportamento ligeiramente inferior ao solvente clorado.

O que pode ter acontecido é o acúmulo de produtos de reação seja de oxidação ou adsorção na superfície da trilha de cobre e o percloroetileno agiu melhor contra eles, seja retirando-os ou auxiliando o fluxo a fazê-lo.

Vemos nos gráficos 2, 3 e 4 que a constante para o solvente clorado é a menor, isto pode significar que a cinética dos fatores que levam à reprovação ou ao demolhamento com este meio de pré-limpeza é mais lenta do que nos outros meios.

A taxa com que decresce a aprovação quando não há pré-limpeza mostra que ela é realmente necessária para aliviar os efeitos causados pelo longo armazenamento. Pode-se dizer portanto que com o tempo a superfície da trilha de cobre vai se modificando e assumindo características que desfavorecem o molhamento.

Os resultados relativos à avaliação da soldagem nas placas montadas foram testados estatisticamente e fornecem com 95 % de certeza. Serão discutidos agora estes resultados.

O álcool forneceu os melhores índices de aprovação, seu efeito sobre o par Cu/Sn garantiu melhor molhamento, pode-se afirmar que não houve diferença nos resultados obtidos para diferentes tempos de armazenamento, mas para as temperaturas as diferenças são significativas, ou seja, o álcool apresenta um máximo de aprovação em temperaturas em torno de 90°C.

Como para a nenhuma pré-limpeza os resultados não diferem, não se pode afirmar que a fração aprovada varia com a temperatura ou com o meio de pré-limpeza. Mas de qualquer forma a aprovação neste caso foi a mais baixa.

O solvente clorado também não percebe as mudanças no tempo de armazenamento, mas em relação à temperatura ele tem um efeito crescente que também não atinge mesmo em seu ponto máximo a aprovação do álcool etílico.

O álcool mostrou portanto que age melhor na remoção de impurezas que prejudicam a ação do fluxo e o molhamento, talvez o solvente clorado deixe resíduos que só são eliminados em altas temperaturas, quando seu desempenho melhora.

7. Conclusão

Ficou provada a necessidade da pré limpeza no processo de solda branda, quanto ao meio, o álcool se mostrou mais efetivo atingindo os melhores resultados em temperaturas de pré-aquecimento próximas de 90°C.

Quanto ao teste de soldabilidade concluiu-se que a sua implantação na linha de montagem não é necessária visto que aprovação neste teste não implica garantia de molhamento na soldagem.

Agradecimentos

- Ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio D. Brandi
- Ao Prof. Dr. Célio Taniguchi
- À Wapsa Auto Peças
- Aos meus pais, irmãos e namorado

8. Bibliografia

(1) Manual para curso interno de solda fraca - Positron

(2) C. J. Thwaites, "Ótima garantia na soldagem de circuito impresso com segurança e qualidade". Artigo apresentado na 1ª conferência Internacional de Soldagem em Detroit, Michigan em abril/1972.

(3) W.G. Bader Bell Lab.; R.E. Beal Packer Eng Associates; F.C. Disque Alpha Metals Inc.; R.O. Johnson Hexacon Electric Company; J.B. Long Tin Research Institute; E.J. Minaruk NI Industries; J.F. Smith Lead Industries Association, "Soldering". Welding Handbook, vol 2, 7 ed.

- (4) C. J. Thwaites, "Técnicas e equipamentos de Soldagem". Tin Research Institute, Greenford, Middlesex.
- (5) Mr. Paul Bud - Eletrovert, "Conceitos e fundamentos de Soldagem". Tradução e adaptação por Eng. Miguel Ferrari Jr. - Glastronic. 1979.
- (6) S. D. Brandi; S. Liu; J.E. Indacochea e R. Xu, "Brazeability and Solderability of Engineering Materials. ASM Handbook, vol 6.
- (7) W. B. Hampshire e J. B. Long, The basic metallurgy of solders and soldering". Tin Research Institute, Inc. Columbus, Ohio. Physical Metallurgy of Metal Joining editado por Ram Kossowsky e M.E. Glicksman. 1980.
- (8) Norma Bosh traduzida - Solda Branda.
- (9) Robert M. Paine e Bob Srinivasan, "Cleaning and Finishing of Cooper and Cooper Alloys" Metals Handbook, vol 5, 9 ed., pg 611.
- (10) Pedro Luiz de Oliveira Costa Neto, "Estatística". Editora Edgard Blucher.

ANEXO 1

Tabela 1 - Teste de soldabilidade

PRÉ LIMPEZA (meio)	ESTOCAGEM (dias)	TESTE SOLDABILIDADE (% de aprovados)				
NENHUM	0	100	100	100	100	100
		med=	100	desv=	0	
NENHUM	10	87.4	86.9	88.3	86.2	88.7
		med=	87.5	desv=	1.017349	
ALCOOL ETÍLICO	10	96.2	95.4	97.3	96.5	95.8
		med=	96.24	desv=	0.723187	
SOLVENTE CI	10	99.3	97.8	98.3	96.9	99.3
		med=	98.32	desv=	1.025671	
NENHUM	20	73.4	74.8	72.7	74.5	72.5
		med=	73.58	desv=	1.037786	
ALCOOL ETÍLICO	20	93.2	94.7	95.4	92.9	94.6
		med=	94.16	desv=	1.064425	
SOLVENTE CI	20	98.5	100	99.6	100	97.9
		med=	99.2	desv=	0.951315	
NENHUM	30	68.9	71.4	70.3	69.3	71.1
		med=	70.2	desv=	1.090871	
ALCOOL ETÍLICO	30	94.7	96.2	95.8	94.1	95.3
		med=	95.22	desv=	0.840833	
SOLVENTE CI	30	98.7	99.3	97.8	99.2	97.2
		med=	98.44	desv=	0.912688	

Tabela 3 - Teste estatístico com interação, nenhuma limpeza

NENHUMA PRÉ LIMPEZA

ESTOCAGEM (dias)		TEMPERATURA (°C)											
		60				80				100			
		X	X2	X	X2	X	X2	X	X2	X	X2	X	X2
10		89.7	8046.09	90.4	8172.16	90.7	8226.49	91.4	8353.96	91.4	8353.96		
		88.4	7814.56	91.8	8427.24	92.1	8482.41	92.6	8574.76	92.6	8574.76		
		90.2	8136.04	89.7	8046.09	92.6	8574.76	90.9	8262.81	1818.4	165362.38		
		88.3	7796.89	90.5	8190.25	91.3	8335.69	92.8	8611.84				3306578.56
		89.5	8010.25	91.8	8427.24	91.9	8445.61	91.8	8427.24				
20		86.5	7482.25	87.3	7621.29	90.2	8136.04	91.6	8390.56				
		87.4	7638.76	89.1	7938.81	91.4	8353.96	90.7	8226.49				
		88.1	7761.61	88.6	7849.96	89.6	8028.16	89.6	8028.16	1784.9	159361.51		3185868.01
		85.9	7378.81	89.6	8028.16	91.9	8445.61	91	8281				
		86.7	7516.89	87.5	7656.25	90.7	8226.49	91.5	8372.25				
30		85.7	7344.49	85.4	7293.16	89.5	8010.25	90.4	8172.16				
		83.8	7022.44	86.7	7516.89	87.6	7673.76	91.2	8317.44				
		85.1	7242.01	84.9	7208.01	88.1	7761.61	91.7	8408.89	1749.7	153194.65		3061450.09
		84.5	7140.25	85.1	7242.01	89.4	7992.36	90.1	8118.01				
		84.3	7106.49	87.2	7603.84	89.3	7974.49	89.7	8046.09				
Ti		1304.1		1325.6		1356.3		1367		5353			9553896.66
Qi			113437.83		117221.36		122667.69		124591.66		477918.54		
T2		1700676.81		1757215.36		1839549.69		1863889		7166130.86			

FTE VAR	SOM QUAD	GRAU LIB	QUAD MED	F	F5%
ENTRE LIN	118.016333	2	59.0081667	78.9406912	3.2
ENTRE COL	165.240667	3	55.0802222	73.685916	2.81
INTERACAO	22.5863333	6	3.76438889	5.03597176	2.3
ENT. TRAT	305.843333	11	27.8039394	37.1959055	2.04
RESIDUAL	35.88	48	0.7475		
TOTAL	341.723333	59			

NENHUM

TEMPERATURAS				
DIAS	60	80	100	120
10	89.2	90.8	91.7	91.9
20	86.9	88.4	90.8	90.9
30	84.7	85.9	88.8	90.6

TEMPERATURA								
60		80		100		120		
XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	
10	89.2	7956.6	90.8	8244.6	91.7	8408.9	91.9	8445.6
20	86.9	7551.6	88.4	7814.6	90.8	8244.6	90.9	8262.8
30	84.7	7174.1	85.9	7378.8	88.8	7885.4	90.6	8208.4
TJ	260.8		265.1		271.3		273.4	1070.6
QJ		22682		23438		24539		24917
TJ2	68017		70278		73604		74748	286646

F VAR	S QUAD	G LIB	Q MED	F	F5%
EN LINH	33.27	3	11.09	3.2301	4.07
RESIDU	27.467	8	3.4333		
TOT	60.737	11			

- NÃO EXISTE DIFERENÇA

NENHUM

TEMPERATURAS				
DIAS	60	80	100	120
10	89.2	90.8	91.7	91.9
20	86.9	88.4	90.8	90.9
30	84.7	85.9	88.8	90.6

ARMAZENAMENTO						
10		20		30		
XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	
60	89.2	7956.64	86.9	7551.61	84.7	7174.09
80	90.8	8244.64	88.4	7814.56	85.9	7378.81
100	91.7	8408.89	90.8	8244.64	88.8	7885.44
120	91.9	8445.61	90.9	8262.81	90.6	8208.36
TJ	363.6		357		350	1070.6
QJ		33055.78		31873.62		30646.7
TJ2	132205		127449		122500	382154

F VAR	S QUAD	G LIB	Q MED	F	F5%
E LINHA	23.12667	2	11.56333	2.767083	4.26
RESI	37.61	9	4.178889		
TOT	60.73667	11			

- NÃO EXISTE DIFERENÇA

ALCOOL

Tabela 5 - Teste estatístico com interação, álcool

ESTOCAGEM (dias)		TEMPERATURA (°C)											
		60				80				100			
		X	X2	X	X2	X	X2	X	X2	X	X2	Ti	Qi
10		97.6	9525.76	96.2	9254.44	98.9	9781.21	99.3	9860.49				
		96.4	9292.96	95.4	9101.16	99.7	9940.09	97.5	9506.25				
		95.9	9196.81	97.3	9467.29	97.9	9584.41	97.1	9428.41	1947.5	189664.45	3792756.25	
		96.3	9273.69	96.5	9312.25	98.1	9623.61	98.4	9682.56				
		97.7	9545.29	95.8	9177.64	97.7	9545.29	97.8	9564.84				
		95.7	9158.49	97.3	9467.29	97.3	9467.29	98	9604				
20		96.8	9370.24	98.7	9741.69	98.8	9761.44	97.6	9525.76				
		97.4	9486.76	99.2	9840.64	97.1	9428.41	97.4	9486.76	1949.2	189987.32	3799380.64	
		97.3	9467.29	97.4	9486.76	99	9801	96.2	9254.44				
		96	9216	97.6	9525.76	98.1	9623.61	96.3	9273.69				
		96.8	9370.24	98.4	9682.56	98.7	9741.69	96.3	9273.69				
		95.4	9101.16	97.3	9467.29	97.4	9486.76	96.7	9350.89				
30		95	9025	96.9	9389.61	97.3	9467.29	97.5	9506.25	1941.7	188530.01	3770198.89	
		96.9	9389.61	98.3	9662.89	98.9	9781.21	97.8	9564.84				
		96.1	9235.21	96.9	9389.61	97	9409	96.1	9235.21				
	Ti	1447.3		1459.2		1471.9		1460		5838.4		11362335.8	
	Qi		139654.51		141966.88		144442.31		142118.08		568181.78		
	T2	2094577.29		2129264.64		2166489.61		2131600		8622031.54			

FTE VAR	SOM QUAD	GRAU LIB	QUAD MED	F	F5%
ENTRE LIN	1.5433333	2	0.77316667	1.17741117	3.2
ENTRE COL	20.1933333	3	6.73111111	10.250423	2.81
INTERACAO	13.2776667	6	2.21294444	3.36996616	2.3
ENT. TRAT	35.0173333	11	3.18333394	4.84780803	2.04
RESIDUAL	31.52	48	0.65666667		
TOTAL	66.5373333	59			

ALCOOL

TEMPERATURAS				
DIAS	60	80	100	120
10	96.8	98.3	98.5	98
20	96.6	98	98.1	97.1
30	96	97.6	97.9	96.9

TEMPERATURA								
60		80		100		120		
XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	
10	96.8	9370.2	98.3	9662.9	98.5	9702.3	98	9604
20	96.6	9331.6	98	9604	98.1	9623.6	97.1	9428.4
30	96	9216	97.6	9525.8	97.9	9584.4	96.9	9389.6
TJ	289.4		293.9		294.5		292	1169.8
QJ		27918		28793		28910		28422
TJ2	83752		86377		86730		85264	342124

F VAR	S QUAD	G LIB	Q MED	F	F5%
LINHA	5.27	3	1.7567	9.5818	4.07
RESI	1.4667	8	0.1833		
TOT	6.7367	11			

- EXISTE DIFERENÇA

ALCOOL

TEMPERATURAS				
DIAS	60	80	100	120
10	96.8	98.3	98.5	98
20	96.6	98	98.1	97.1
30	96	97.6	97.9	96.9

ARMAZENAMENTO						
10		20		30		
XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	
60	96.8	9370.24	96.6	9331.56	96	9216
80	98.3	9662.89	98	9604	97.6	9525.76
100	98.5	9702.25	98.1	9623.61	97.9	9584.41
120	98	9604	97.1	9428.41	96.9	9389.61
TJ	391.6		389.8		388.4	1169.8
QJ		38339.4		37987.6		37715.8
TJ2	153351		151944		150855	456149

F VAR	S QUAD	G LIB	Q MED	F	F5%
LINHA	1.28667	2	0.64333	1.06239	4.26
RESI	5.45	9	0.60556		
TOT	6.73667	11			

- NÃO EXISTE DIFERENÇA

CLORO

ESTOCAGEM (dias)	TEMPERATURA (°C)											
	60			80			100			120		
	X	X2	X	X2	X	X2	X	X2	X	X2	Ti	Qi
10	89.4	7992.36	91.6	8390.56	93.4	8723.56	94.7	8968.09				
	91.3	8335.69	91.7	8408.89	93.9	8817.21	93.2	8686.24				
	90.9	8262.81	90.1	8118.01	92.5	8556.25	92.8	8611.84			1839	169150.9
	90.1	8118.01	90.3	8154.09	92.1	8482.41	94.3	8892.49				
	89.3	7974.49	90.6	8208.36	92.3	8519.29	94.5	8830.25				
20	92.1	8482.41	92.8	8611.84	94.2	8873.64	94.6	8949.16				
	90.4	8172.16	91.3	8335.69	93.1	8667.61	94.6	8949.16				
	90.6	8208.36	91.5	8372.25	92.8	8611.84	94.8	8987.04			1862.2	173448.66
	90.9	8262.81	93.1	8667.61	94.5	8830.25	95.7	9158.49				
	92	8464	92	8464	94.7	8968.09	96.5	9312.25				
30	91.7	8408.89	90.8	8244.64	94.2	8873.64	95.3	9082.09				
	90.8	8244.64	91.5	8372.25	93.5	8742.25	95.6	9139.36				
	89.7	8046.09	91.7	8408.89	93	8649	95.7	9158.49			1856.8	172445.68
	91.6	8390.56	92.4	8537.76	92.7	8593.29	93.8	8798.44				
	90.7	8226.49	92.9	8630.41	94.9	9006.01	94.3	8892.49				
Ti	1361.5		1374.3		1401.8		1420.4				5558	10297416.1
Qi		123589.77		125925.25		131014.94						515045.24
Ti2	1853682.25		1888700.49		1965043.24		2017536.16				7724962.14	

FTE VAR	SOM QUAD	GRAU LIB	QUAD MED	F	F5%
ENTRE LIN	14.7373333	2	7.36866667	10.8044966	3.2
ENTRE COL	141.409333	3	47.1364444	69.1150212	2.81
INTERCAO	29.0666667	6	4.84444444	7.10329097	2.3
ENT. TRAT	156.437333	11	14.2215758	20.8527504	2.04
RESIDUAL	32.736	48	0.682		
TOTAL	189.173333	59			

Tabela 8 - Teste estatístico solvente clorado

CLORO

TEMPERATURAS				
DIAS	60	80	100	120
10	90.2	90.9	92.8	93.9
20	91.2	92.1	93.9	95.2
30	90.9	91.9	93.7	94.9

TEMPERATURA								
60		80		100		120		
XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	
10	90.2	8136	90.9	8262.8	92.8	8611.8	93.9	8817.2
20	91.2	8317.4	92.1	8482.4	93.9	8817.2	95.2	9063
30	90.9	8262.8	91.9	8445.6	93.7	8779.7	94.9	9006
TJ	272.3		274.9		280.4		284	1111.6
QJ		24716		25191		26209		26886
TJ2	74147		75570		78624		80656	308997

F VARS	QUAD	G LIB	Q MED	F	F5%
LINH	27.94	3	9.3133	25.115	4.07
RESI	2.9667	8	0.3708		
TOT	30.907	11			

- EXISTE DIFERENÇA

TEMPERATURAS				
DIAS	60	80	100	120
10	90.2	90.9	92.8	93.9
20	91.2	92.1	93.9	95.2
30	90.9	91.9	93.7	94.9

ARMAZENAMENTO						
10		20		30		
TEMPER	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2	XIJ	XIJ2
60	90.2	8136	91.2	8317.4	90.9	8262.8
80	90.9	8262.8	92.1	8482.4	91.9	8445.6
100	92.8	8611.8	93.9	8817.2	93.7	8779.7
120	93.9	8817.2	95.2	9063	94.9	9006
TJ	367.8		372.4		371.4	1111.6
QJ		33828		34680		34494
TJ2	135277		138682		137938	411897

F VARS	QUAD	G LIB	QUA ME	F	F5%
EN LINH	2.9267	2	1.4633	0.4707	4.26
RESIDU	27.98	9	3.1089		
TOT	30.907	11			

- NÃO EXISTE DIFERENÇA

ANEXO 2

Temperatura de 25°C

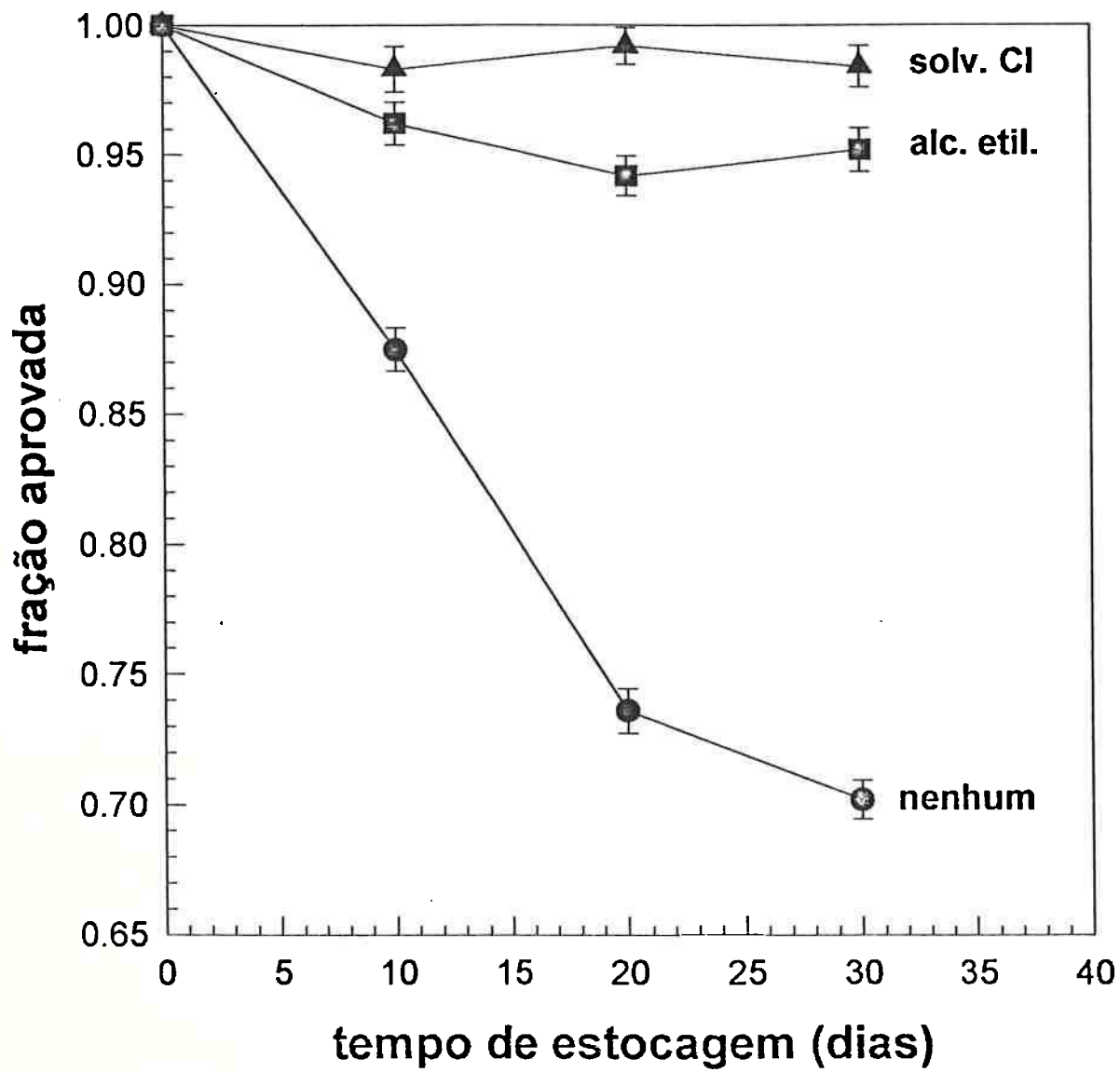


Gráfico 1 - fração aprovada X tempo de estocagem com solvente clorado, álcool e nenhuma pré limpeza para TEMPERATURA DE 25°C

Temperatura de 25°C, nenhuma pré-limpeza

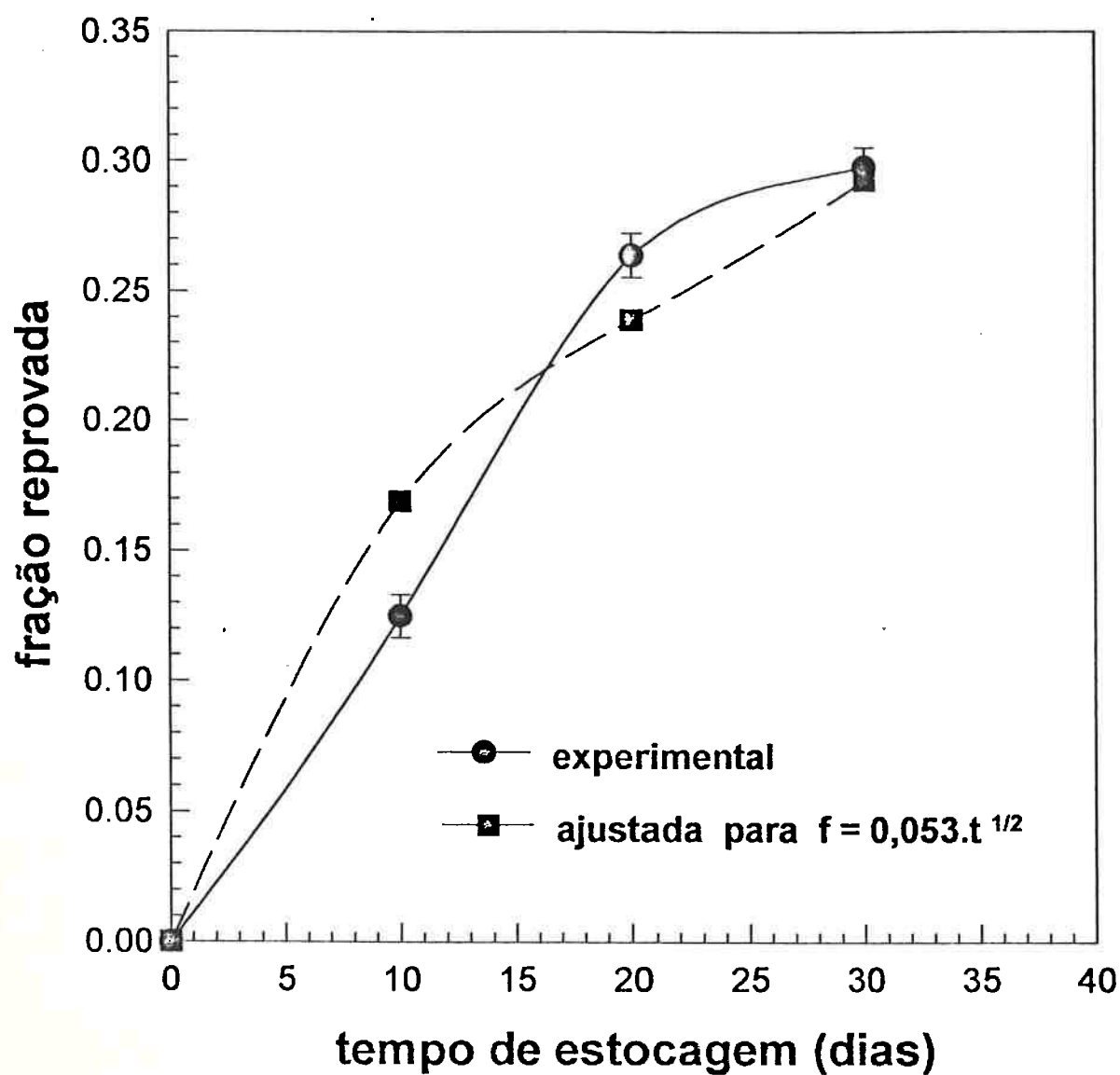


Gráfico - 2: Fração reprovada X tempo de estocagem para nenhuma pré limpeza com TEMPERATURA DE 25°C

Temperatura de 25°C, álcool etílico

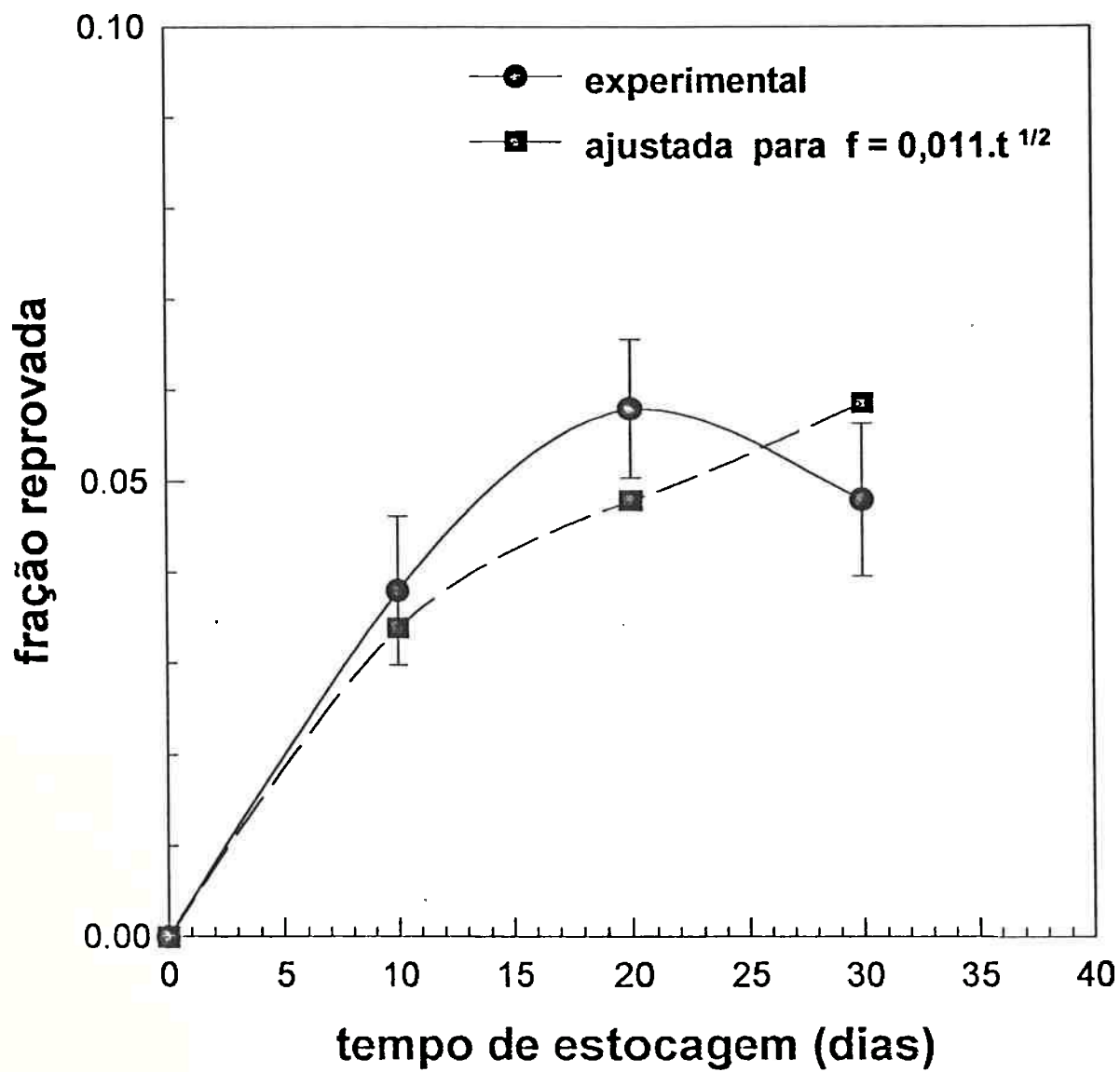


Gráfico - 3: Fração reprovada X tempo de estocagem para álcool etílico com
TEMPERATURA DE 25°C

Temperatura de 25°C, solvente clorado

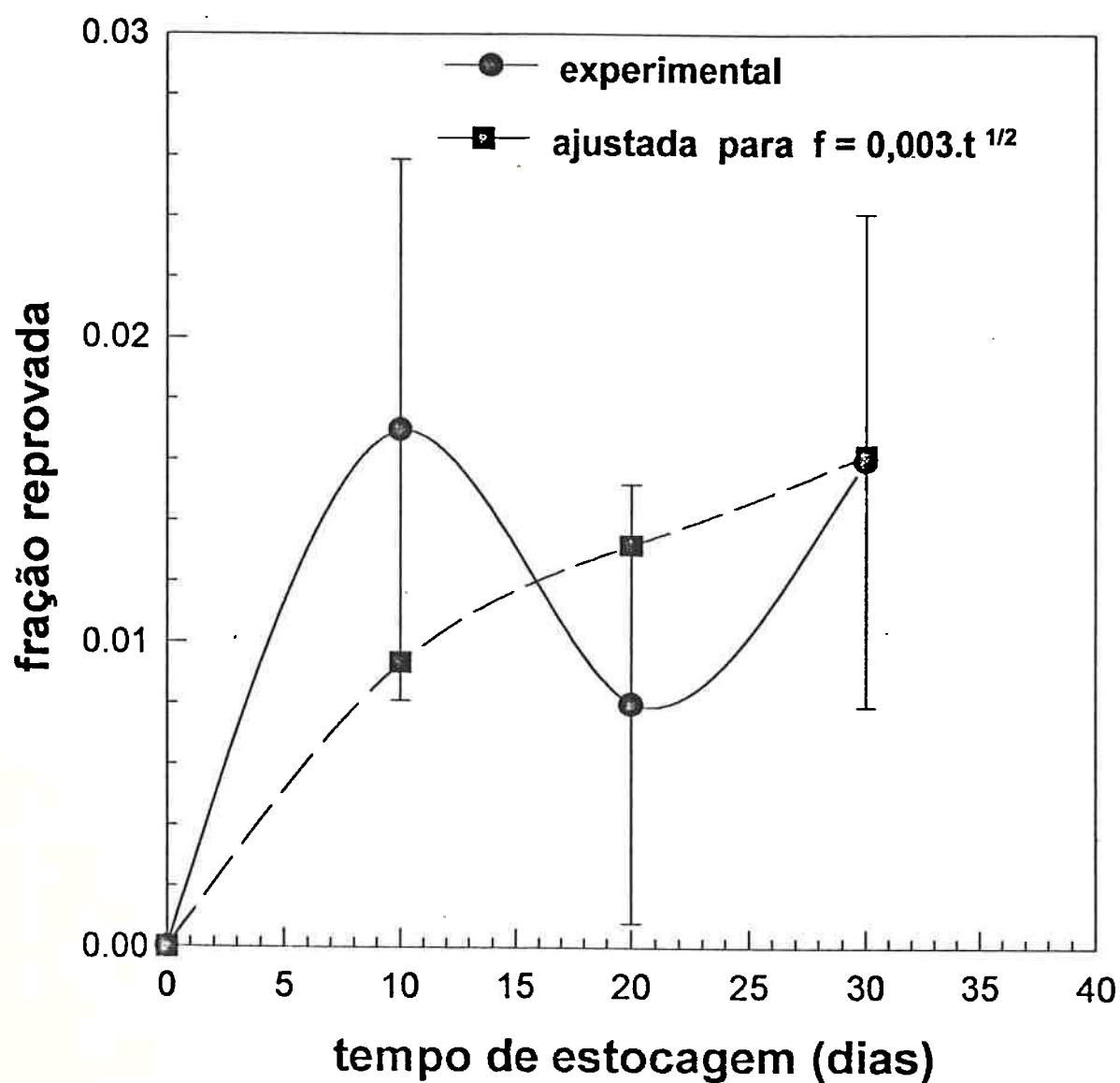


Gráfico - 4: Fração reprovada X tempo de estocagem para solvente clorado
com TEMPERATURA DE 25°C

Nenhuma pré-limpeza

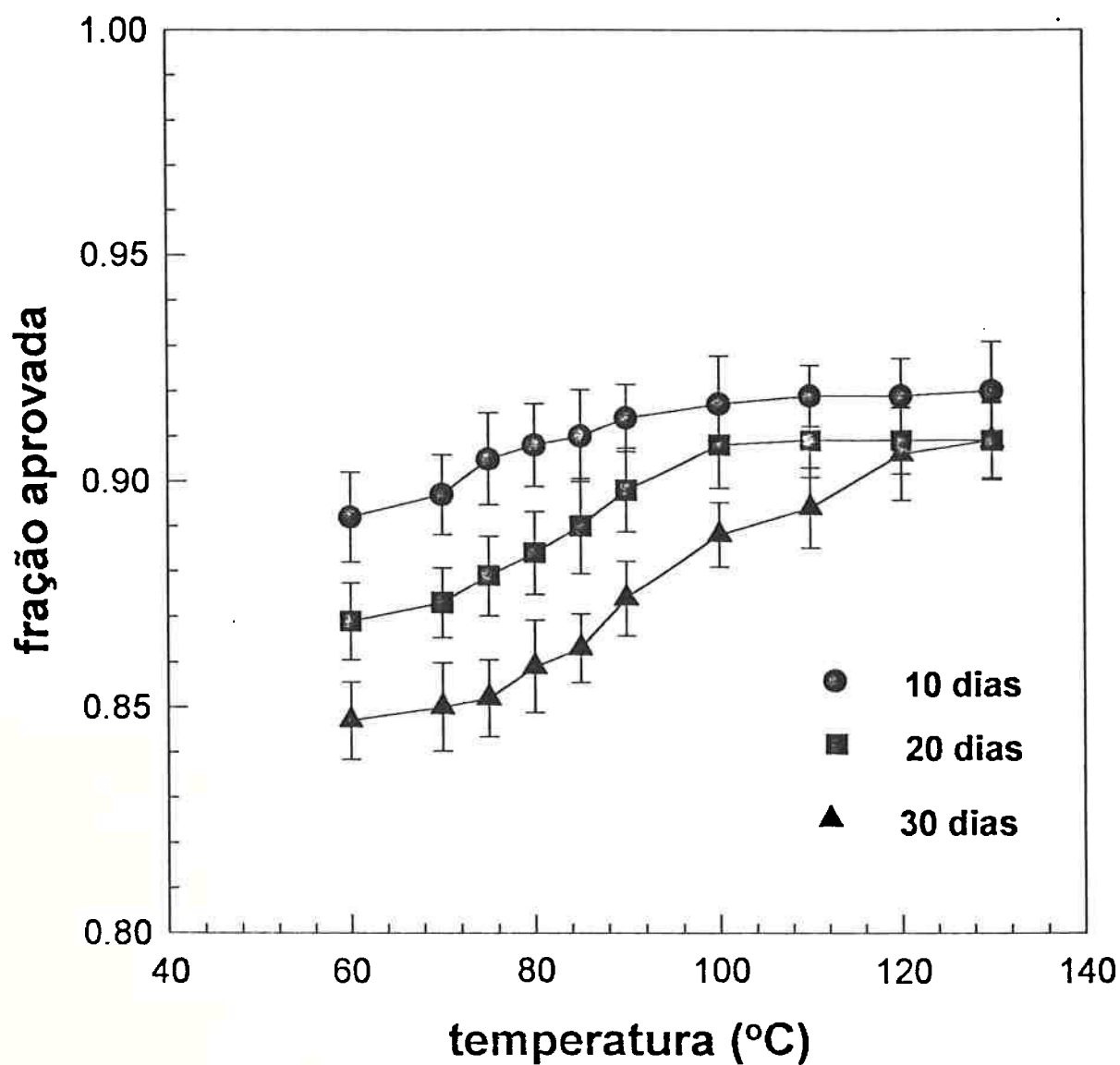


Gráfico - 5: Fração aprovada X temperatura em 10, 20 ou 30 dias de armazenamento para NENHUMA PRÉ LIMPEZA

Pré-limpeza com álcool etílico

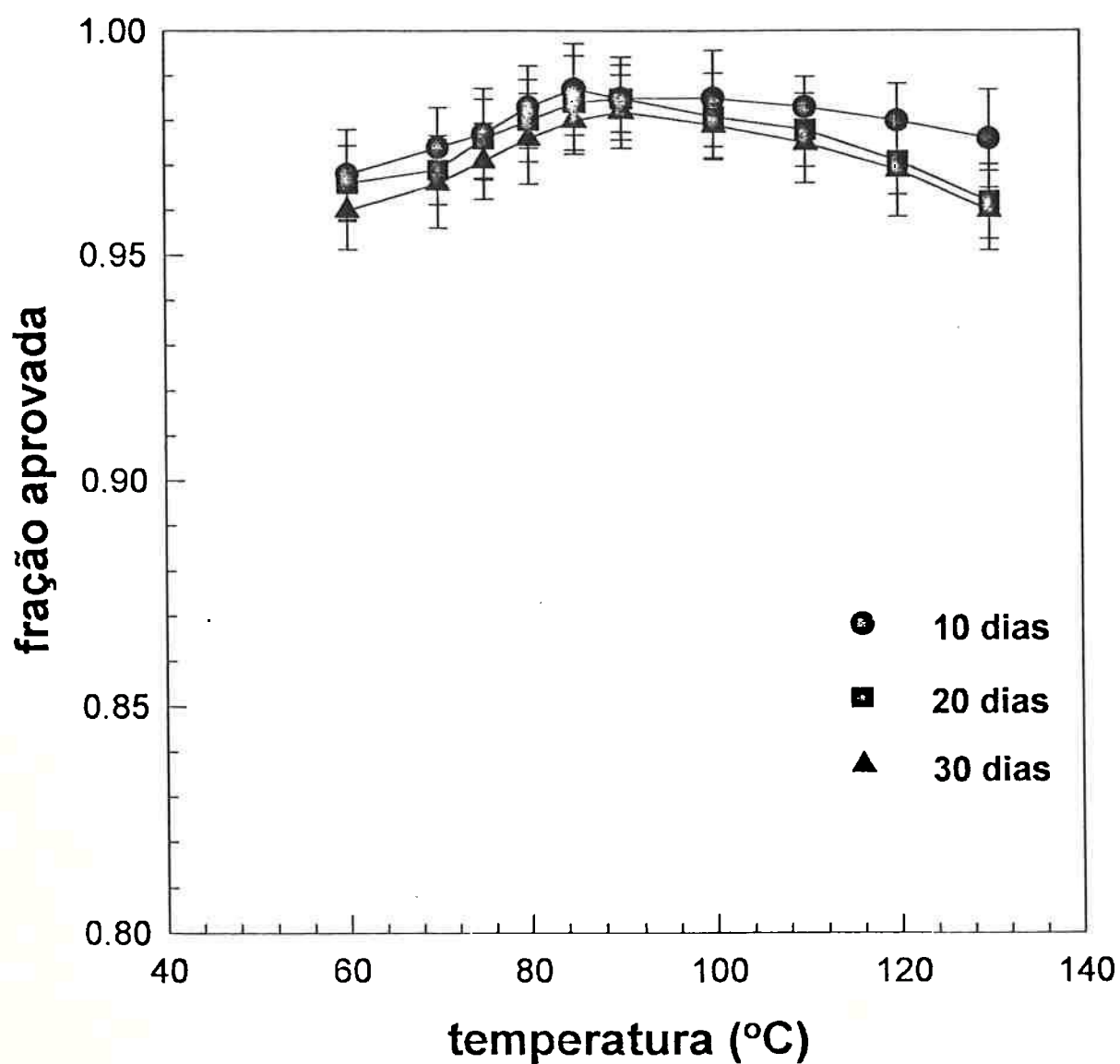


Gráfico - 6: Fração aprovada X temperatura em 10, 20 ou 30 dias de armazenamento para ÁLCOOL ETÍLICO

Pré-limpeza com solvente clorado

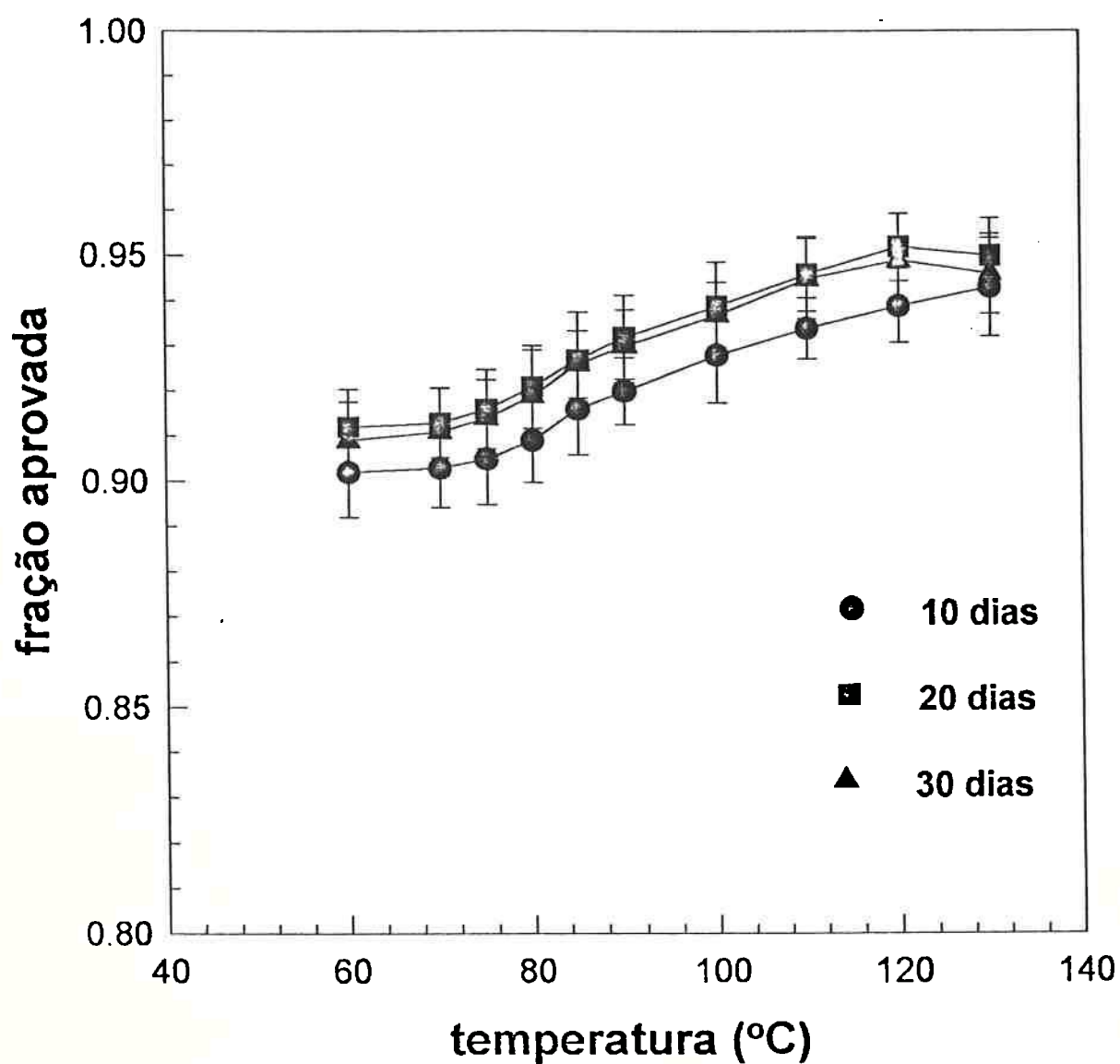


Gráfico - 7: Fração aprovada X temperatura em 10, 20 ou 30 dias de armazenamento para SOLVENTE CLORADO

Temperatura de 60°C

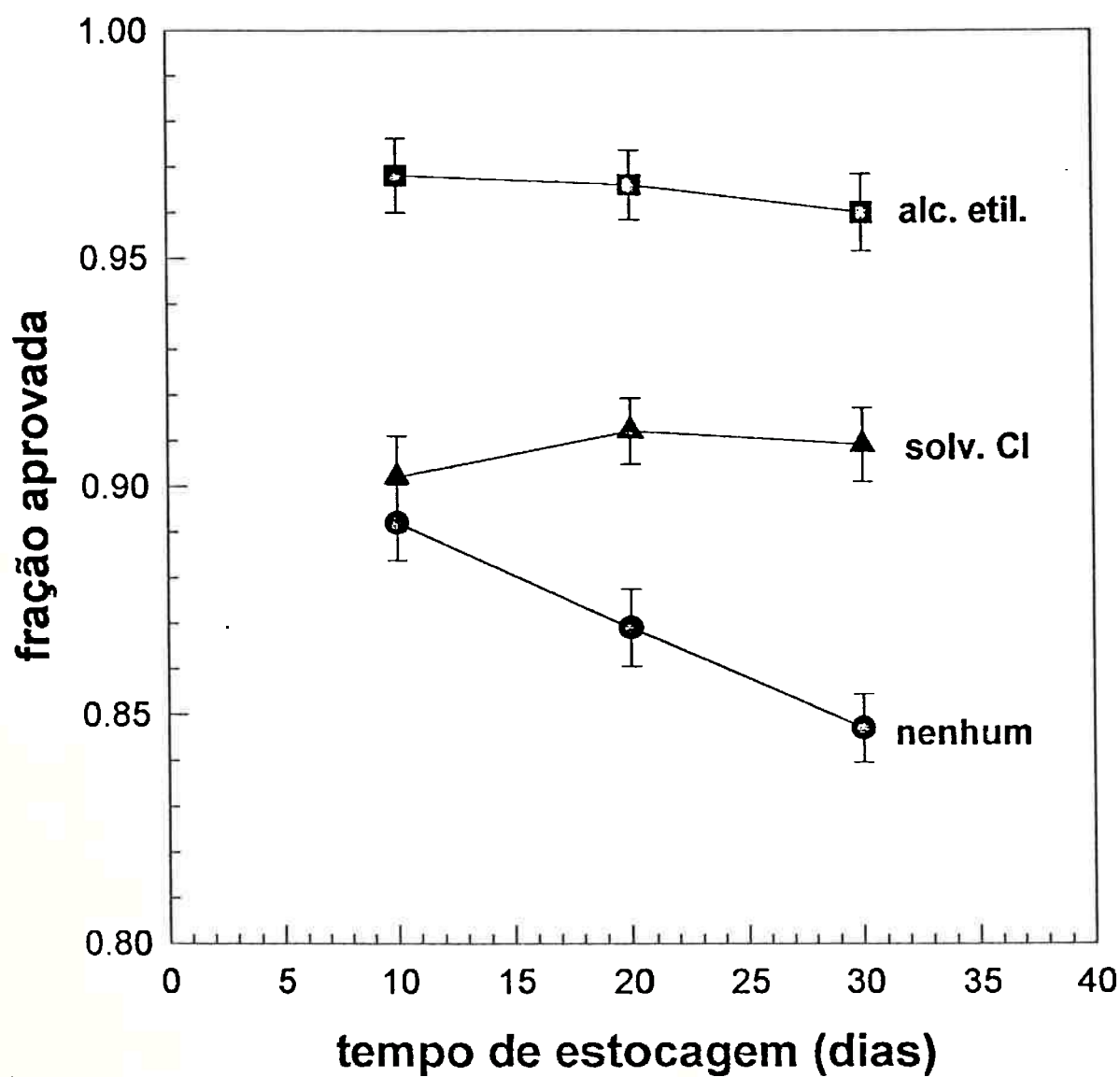


Gráfico - 8: Fração aprovada X tempo de estocagem nos três meios de pré-limpeza para TEMPERATURA DE 25°C

Temperatura de 80°C

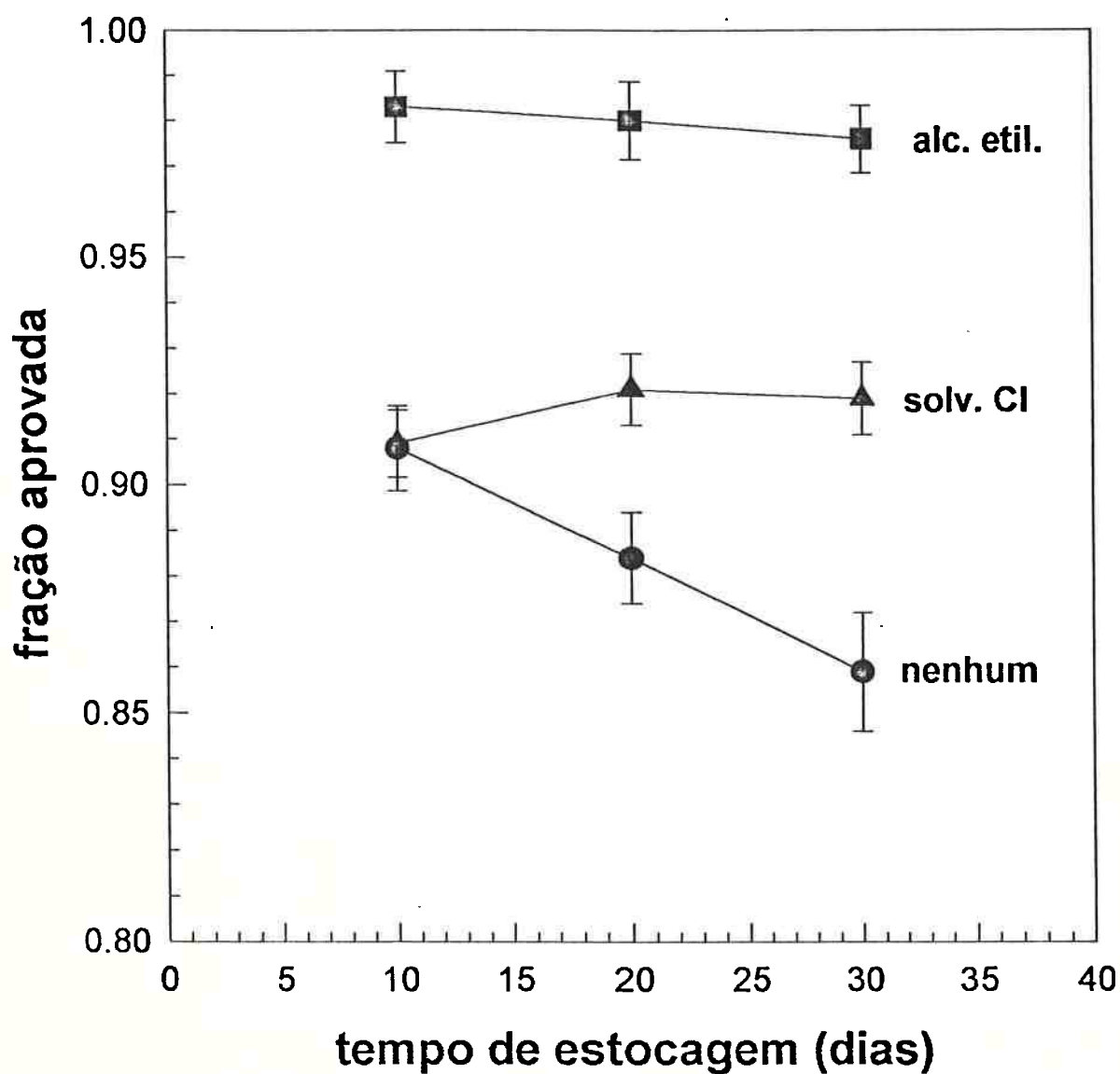


Gráfico - 9: Fração aprovada X tempo de estocagem nos três meios de pré-limpeza para TEMPERATURA DE 25°C

Temperatura de 100°C

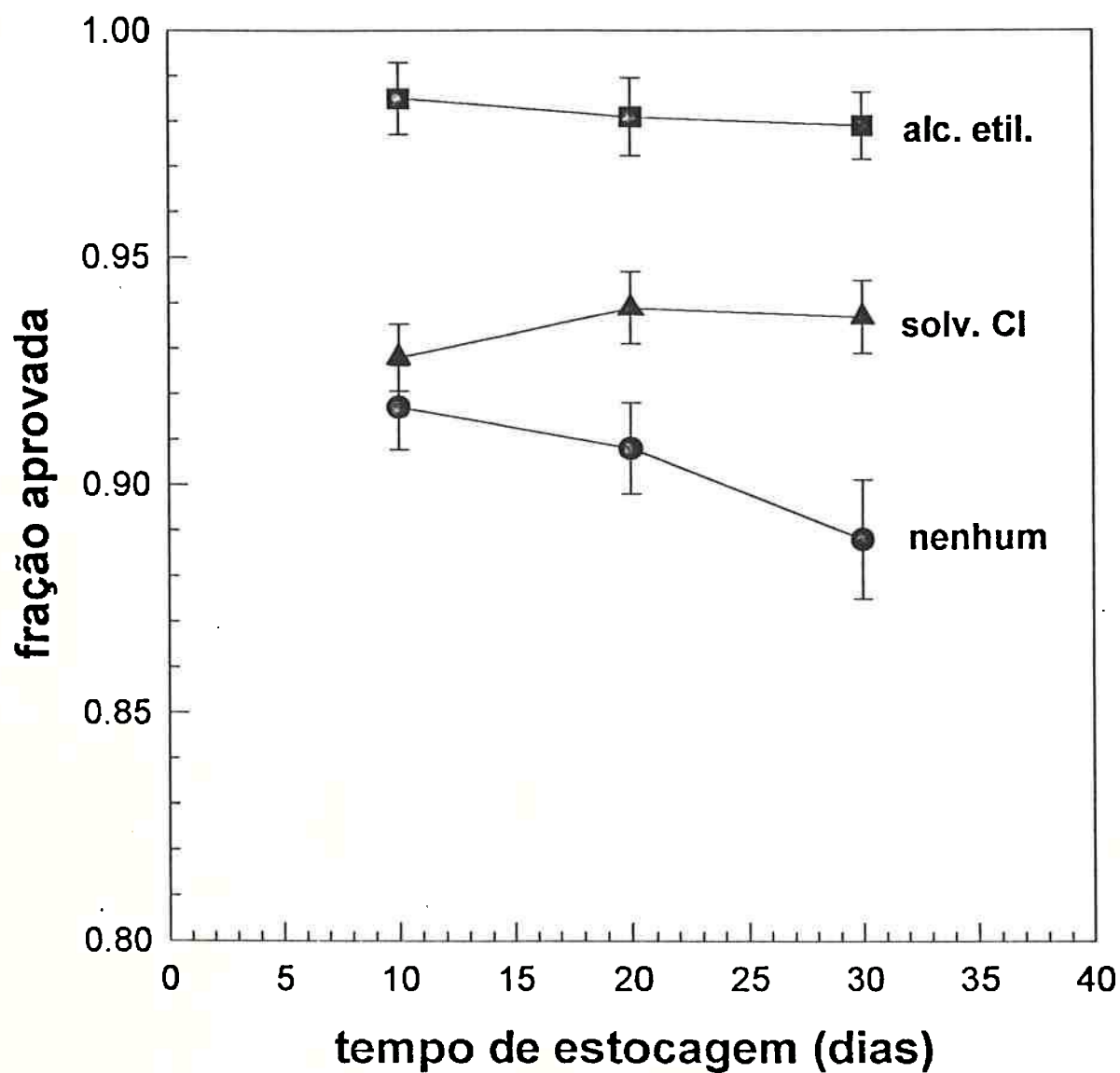


Gráfico - 10: Fração aprovada X tempo de estocagem nos três meios de pré-limpeza para TEMPERATURA DE 25°C

1

SILVANA PATRÍCIA HLEAP

**ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE
SOLDA BRANDA EM PLACAS DE CIRCUITO
IMPRESSO**

Trabalho de Formatura

Departamento de Engenharia Metalúrgica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Sérgio D. Brandi

**São Paulo
1994**

Temperatura de 120°C

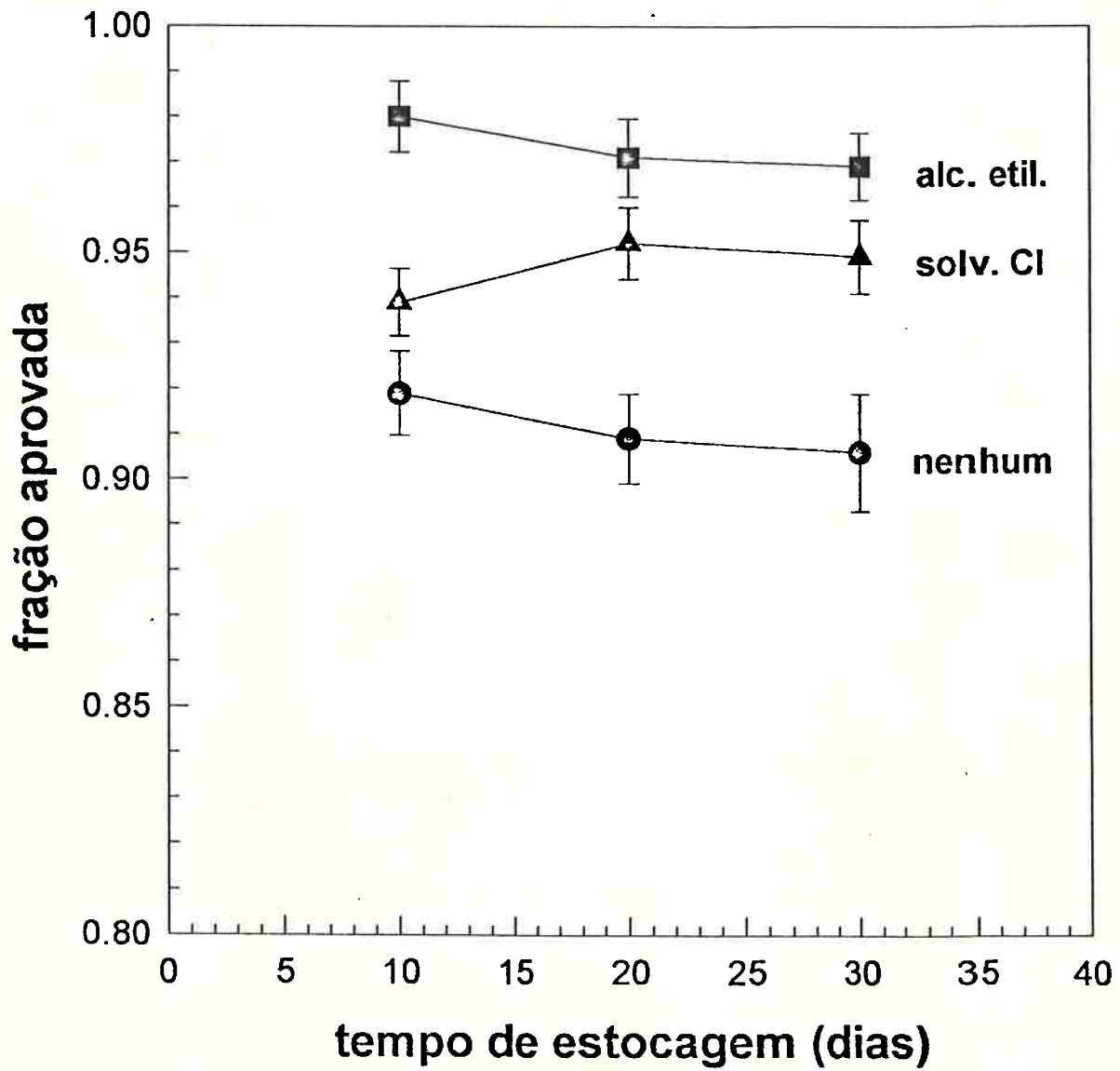


Gráfico - 11: Fração aprovada X tempo de estocagem nos três meios de pré-limpeza para TEMPERATURA DE 25°C