

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

**Departamento de Engenharia Metalúrgica
e de Materiais**

Projeto de Formatura 1993

**Caracterização de uma liga Al-Sn para
casquilhos**

Aluno:	Joern Schmidt
Nº USP:	1826038/89
Orientador:	Paulo Sérgio C. P. da Silva
Co-Orientador:	Joaquim de O. Ramos Júnior
Local:	Metal Leve S/A Indústria e Comércio GP&T - Centro Tecnológico

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos	3
3. Fundamentos	4
3.1. O casquilho e propriedades desejadas	4
3.2. A liga AlSn20Cu1	7
3.2.1. Microestrutura bruta de fusão	7
3.2.2. Efeito do tratamento termo-mecânico	9
3.3. Fadiga	10
3.3.1. Aspectos gerais	10
3.3.2. Aspectos estruturais da fadiga	12
3.3.3. Fadiga em Casquilhos	14
3.3.4. Propagação de trinca através da liga Al-Sn-Cu	15
3.3.5. A máquina Amsler para ensaio de fadiga	16
4. Parte Experimental	17
4.1. Preparação das amostras	17
4.2. Análise metalográfica	19
4.3. Avaliação das propriedades mecânicas	19
5. Resultados e Discussão	20
5.1. Metalografia	20
5.2. Propriedades mecânicas	27
5.2.1. Tração	27
5.2.2. Fadiga	28
6. Conclusões	36
7. Referências bibliográficas	37

1. Introdução

Casquilhos são peças cuja função é suportar o carregamento dinâmico de um eixo, por exemplo, de motor a explosão, aumentando a eficiência do mesmo, além de aumentar a vida dos componentes de custo elevado. Este carregamento pode ser radial, o que deu origem aos casquilhos comuns, mas pode também apresentar uma componente axial, sendo então necessários os casquilhos com flanges ou com arruela de encosto (13).

Os casquilhos devem possuir certas propriedades como resistência ao engripamento, à fadiga e corrosão entre outros, que serão descritas adiante na secção 3 "Fundamentos".

As ligas de alumínio foram desenvolvidas, porque possuem estas propriedades e seu custo é inferior. Sabe-se da existência de patentes sobre ligas Al-Sn-Pb datando do início do século, mas nos anos 60 é que as ligas Al-Sn é que adquiriram importância dominando boa parte do mercado (5).

Ainda hoje possuem elevada importância, mas devido à evolução dos motores de combustão interna, aumentando o carregamento específico dos casquilhos e muitos outros componentes, as ligas de alumínio mais consagradas se viram em uma situação difícil: embora tivessem resistência ao engripamento, elas não podiam ser aplicadas em situações mais severas, pois ocorriam falhas por fadiga da liga.

Isto levou ao desenvolvimento de novas ligas de alumínio com propriedades superiores tanto em fadiga quanto em resistência ao engripamento. Mas estas ligas, são mais caras o que muitas vezes não justifica o seu emprego.

Face a este histórico tem-se a saída de melhorar as propriedades das ligas existentes mudando a sua composição ou o processamento termo-mecânico que proporcionem um aumento da resistência a fadiga e portanto permitindo a sua aplicação em condições mais severas.

Mas para que se possa avaliar o desempenho destas melhorias, é necessário um ensaio que o faça de forma barata e rápida. O ensaio em um motor preso a uma bancada de testes não pode ser considerado, pois o custo é elevado. Outros ensaios, como os em máquina Underwood, são uma saída, mas são feitos em peças o que leva a um aumento de custos. Outro fator negativo quanto a ser realizado nestas máquinas é o fato da manufatura destas amostras ser feita em linha de produção, sendo necessário interromper a mesma, ou muitas vezes esperar uma melhor hora para confeccioná-las.

Estes fatores levaram a decidir pelo desenvolvimento de ensaios de fadiga em tiras semi-acabadas, que podem ser retiradas da produção rapidamente e com poucas operações de usinagem adaptadas para ensaio.

2. Objetivos

Desenvolver um ensaio de fadiga para tiras de liga de alumínio semi-acabadas. Neste ensaio deverá ser utilizada a máquina Amsler, disponível na empresa.

Avaliar as propriedades mecânicas, principalmente a resistência à fadiga, de uma liga de alumínio-estanho para casquilhos. Deverão ser analisadas três versões do mesmo material, que diferem na sua produção.

3. Fundamentos

Para que se possa desenvolver qualquer projeto, é necessário inicialmente entender as necessidades, para que os objetivos sejam bem conhecidos. No presente caso, é necessário uma abordagem das condições de trabalho de um casquilho, ressaltando a necessidade de certas propriedades para compreender o contexto de certos aspectos.

3.1. O casquilho e propriedades desejadas

Os casquilhos podem ser divididos segundo critério estrutural (13):

- Casquilhos monometálicos: feitos de um único material;
- Casquilhos bimetálicos: compostos de duas camadas de materiais, geralmente uma liga de cobre ou alumínio recobrendo tira de aço.
- Casquilhos trimetálicos: compostos de três materiais, sendo semelhante aos casquilhos bimetálicos, diferindo em um camada adicional eletrodepositada de chumbo-estanho-cobre.

OBS.: Nesta classificação não são consideradas camadas de ligação, difusão e outras, como, por exemplo, o alumínio puro entre liga de alumínio-estanho e aço.

Atualmente, os tipos mais utilizados são os bimetálicos e trimetálicos, pois há um efeito benéfico nas propriedades das ligas de casquilhos: a sua capacidade de carga e resistência a fadiga aumentam quando camadas finas

são aderidas a um substrato de maior resistência, como o aço baixo carbono (13).

As propriedades desejadas dos materiais de casquilhos estão expressas nas características abaixo expostas (13):

- Compatibilidade: propriedade dos materiais de casquilhos de resistir ao dano ou adesão entre sua superfície e do eixo. A adesão destes dois componentes ocorre pelo aumento da pressão e temperatura devido a lubrificação marginal, ocasionando uma soldagem entre os materiais. A compatibilidade é determinada por dois fatores: i) diâmetro atômico do material do eixo em relação ao material do casquilho e ii) natureza da ligação entre os átomos destes materiais. Diz-se de boa compatibilidade com o aço, caso o material possua um diâmetro atômico 15% maior que o do ferro. Materiais comerciais que estão dentro deste critério são: prata, cádmio, índio, estanho, ouro, chumbo e bismuto.
- Comformabilidade: capacidade do material de se acomodar a pequenos desvios de alinhamento ou variação da dimensão do apoio do casquilho.
- Embutibilidade: habilidade do material de agregar a sua superfície partículas intrusas, protegendo tanto a sua superfície como a do eixo de riscamento.
- Capacidade de carga: pressão máxima a que o material do casquilho pode ser submetido sem que ocorra excessivo desgaste ou atrito e dano por fadiga.
- Resistência a fadiga: capacidade do material de trabalhar sobre cargas cíclicas abaixo do seu limite de escoamento.

- Resistência a corrosão: capacidade do material de resistir ao ataque químico de substâncias presentes no lubrificante.
- Dureza: resistência do material a deformação plástica por compressão, medida através de ensaios de durezas.
- Resistência: habilidade do material de resistir a deformação elástica e plástica sob carregamento, e medido convencionalmente por ensaios de tração, compressão e cisalhamento.

As características apresentadas são as que definem propriedades dos materiais para casquilhos.

Em um motor de combustão interna tem-se certas condições às quais os casquilhos são submetidas e precisam resistir. A seguir, há uma breve descrição destas solicitações, para facilitar a visualização das necessidades das propriedades apresentadas.

A partida de um motor de combustão ocorre com um contato direto entre o eixo e o mancal, pois ainda não há pressão para a formação do filme de lubrificante. Se o material não for adequado à aplicação ocorrerá um desgaste excessivo deste material e também poderá acontecer o fenômeno de "engripamento", ou seja, adesão entre o eixo e o casquilho por aquecimento localizado e solda entre os materiais. Este fenômeno também pode ocorrer durante o regime normal de funcionamento caso o fornecimento de lubrificante seja marginal.

Outra solicitação importante é a variação da pressão e espessura do filme de lubrificante, o que pode causar fadiga.

A existência de partículas dentro do lubrificante pode acontecer por contaminação externa ou por desgaste interno de certos componentes. Estas partículas podem influenciar no suprimento de lubrificante ou riscamento da superfície do casquilho/eixo caso não sejam eliminadas. Uma possibilidade é o alojamento na superfície do casquilho, desde que este componente possua uma camada mais mole, como no caso de componentes trimetálicos, ou uma fase mais mole, em bimetálicos.

3.2. A liga AlSn20Cu1

Esta liga de alumínio é composta basicamente de 20%Sn, 1%Cu e de pequena quantidade de titânio como refinador de grão na fundição. É denominada de SAE 783, segundo a *Society of Automotors Engineering*.

3.2.1. Microestrutura bruta de fusão

Durante a solidificação (1,4,5,6) desta liga ternária a solubilidade do estanho cai de 100% no estado líquido, para menos de 0,1% no estado sólido. A solubilidade do alumínio também é bastante baixa dentro da fase Sn, como pode ser visto na figura 1. Isto leva inicialmente a uma microestrutura de grãos de alumínio (praticamente puros) envoltos por uma fase de baixo ponto de fusão (estanho praticamente puro), que forma uma rede tridimensional. A pequena quantidade de cobre presente nesta liga está sob

duas formas - em solução sólida ou na forma de CuAl_2 .

Abaixo estão os diagramas de fase Al-Sn, Al-Cu e Al-Sn-Cu.

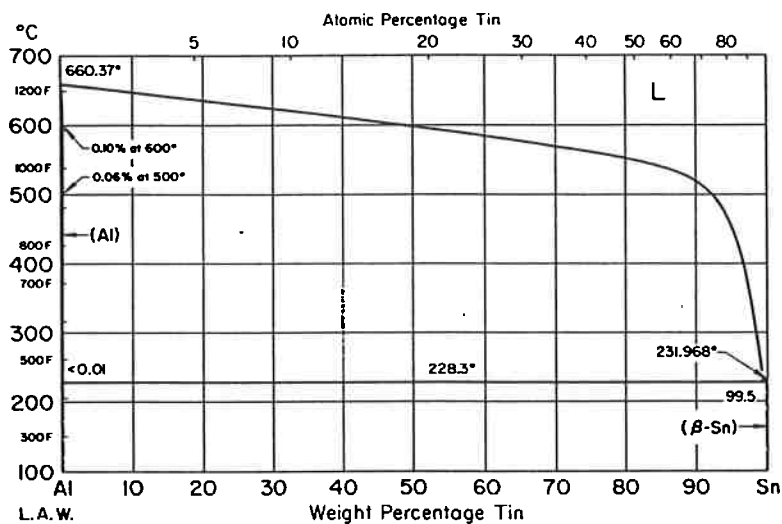


Figura 1 - Diagrama Binário Al-Sn (19).

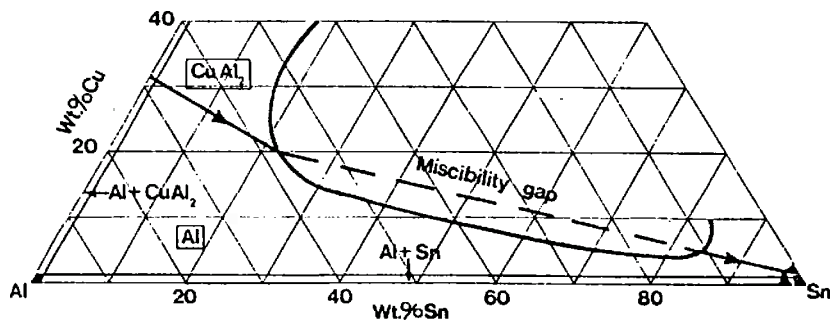


Figura 2 - Diagrama Ternário Al-Sn-Cu (7). 500 K.

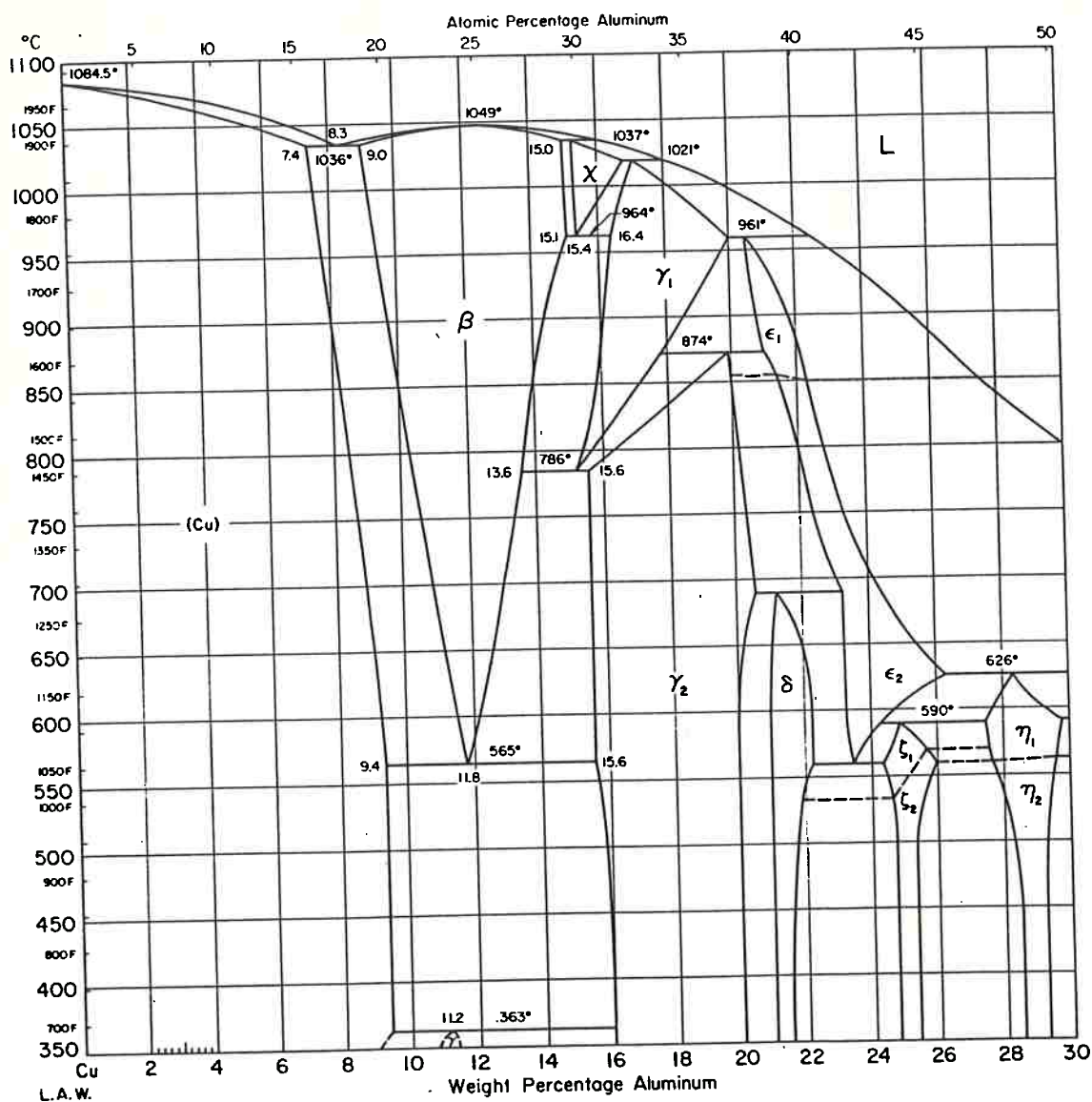


Figura 3 - Diagrama Binário Al-Cu (19).

3.2.2. Efeito do tratamento termó-mecânico

Durante a laminação deste material o sistema todo se deforma, e os grãos de alumínio e de estanho se alongam, sendo que o estanho fica com uma aparência de fibra dentro de uma matriz.

Durante o tratamento térmico, feito a uma temperatura da ordem de 350°C ou superior, ocorre a recristalização do

alumínio. O estanho contido na liga a esta temperatura, se liquefaz levando a expansão volumétrica e portanto à exsudação deste para fora da liga na região superficial.

Este fenômeno esta esquematizado a ser seguir.

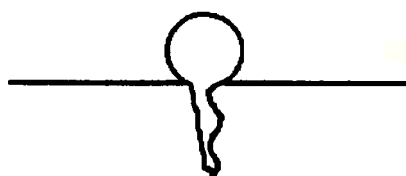


Figura 4 - Esquema de exsudação de estanho durante tratamento térmico com temperatura maior que 232°C (fusão do Sn).

3.3. Fadiga

3.3.1. Aspectos gerais

A fadiga(8,15,16) é um fenômeno que ocorre em metais submetidos a variações na tensão, que geram mudanças estruturais irreversíveis e acumulativas que podem levar à fratura. Muitas vezes as mudanças não são óbvias e portanto dificultam o entendimento do fenômeno da fadiga.

A fratura ocasionada por fadiga pode ser reconhecida por certos aspectos. Geralmente apresenta duas regiões distintas, sendo uma delas mais lisa, o caminho de propagação da trinca de fadiga, e outra mais rugosa, decorrente da fratura frágil do componente. Na região mais lisa eventualmente podem ser vistas as chamadas estrias que são ondulações na superfície da fratura mostrando o avanço da trinca. Estas marcas tem alguma peculiaridade: elas

nunca se cruzam e são geradas em um único ciclo, apesar que nem todo ciclo gera uma estria.

O estudo sistemático de fadiga (15) iniciou com Wöhler em eixos ferroviários obtendo curvas, atualmente chamadas de curvas S-N, que relacionam nos dois eixos, a amplitude de tensão com o número de ciclos para fratura.

Para se ter fratura por fadiga são necessárias pelo menos três coisas (8):

- 1) tensão máxima de valor suficientemente alto;
- 2) amplitude de oscilação de tensão suficiente, para causar mudança estrutural localizada;
- 3) número de ciclos adequado às condições descritas anteriormente.

A fadiga também possui outras características que relacionam a vida (número de ciclos até ruptura) à tensão. São elas (15):

- a) Abaixo de certa tensão não ocorre fratura por fadiga, independente do número de ciclos, isto é o conhecido limite de fadiga;
- b) A vida é tanto menor quanto maior a amplitude de oscilação de tensão, para tensões acima do valor de limite de fadiga;
- c) Fatores como concentração de tensão diminuem o limite de fadiga e a vida, quando considerados com mesma tensão.

Como fatores de concentração de tensão podem ser considerados: cantos vivos, inclusões de óxido, trincas de resfriamento, entre outros.

A fratura por fadiga é um fenômeno que pode ser dividido em cinco etapas (15,16,18):

- 1) mudança estrutural decorrente de variações cíclicas na tensão, o que antecede a nucleação de trincas;
- 2) nucleação de uma ou várias micro-trincas;
- 3) coalescimento destas micro-trincas em uma ou várias macro-trincas;
- 4) Coalescimento em uma ou várias macro-trincas;
- 5) Ruptura.

3.3.2. Aspectos estruturais da fadiga

A deformação uniaxial e o fenômeno de fadiga (8) possuem característica em comum: em ambos os casos a deformação ocorre por movimentação de discordâncias, nos mesmos planos atômicos. Geralmente pode-se dizer que o início da trinca em fadiga se dá em regiões onde houve intensa deformação.

A existência de deformação localizada não significa que haverá a nucleação de trincas, pois mesmo em materiais ferrosos, em solicitação abaixo do limite de fadiga há deformação plástica localizada e que não leva a ruptura.

Uma vez formadas as trincas de fadiga elas tendem a, inicialmente, se propagar ao longo dos planos de escorregamento e posteriormente adquirir direção normal à máxima tensão aplicada. Sua propagação normalmente é transgranular.

Outro importante fenômeno é que aparentemente há a formação de grande quantidade de defeitos pontuais durante

a fadiga. Estudos em placas finas de alumínio mostraram que durante solicitações cíclicas de alta tensão se formam redes de discordâncias semelhantes à deformação plástica unidirecional. Em ciclagem a baixa tensão estes mesmos estudos revelaram estrutura semelhante a de amostras resfriadas bruscamente. Isto leva à indicação de que, por exemplo, ligas de alumínio endurecíveis por precipitação, podem sofrer superenvelhecimento decorrente de deformação plástica causada por fadiga.

Para se avaliar a fadiga de certo componente, é necessário saber o aspecto mais geral deste fenômeno, que é citado por Silva em (18):

"qualquer fator que provoque a localização de deformação plástica, ou seja, contribua para que a deformação plástica se torne menos homogênea, diminui a resistência à fadiga. É interessante notar que esta generalização é válida qualquer que seja a dimensão que se considere: desde a presença de precipitados não-coerentes na estrutura, o valor da energia de defeito de empilhamento, etc, até a geometria de um componente ou estrutura, a eficácia de 'reforços', a presença de cordões de solda, etc."

Ainda neste trabalho o autor comenta certos aspectos interessantes, sobre alguns artifícios possíveis de serem utilizados para aumentar a resistência à fadiga, ou pelo menos não deteriorá-la.

Um dos pontos abordados é a nucleação em inclusões ou porosidades, onde menciona que, em regime de baixas deformações, estes defeitos geram concentração de

deformação plástica levando à nucleação de trincas de fadiga. No entanto, menciona que na literatura há a referência de que partículas de segunda fase somente são deletérias a partir de certo tamanho, no caso de alumínio este seria em torno de 5 a 10 μ m.

3.3.3. Fadiga em Casquilhos

A fadiga em casquilhos (11, 12, 20, 21) ocorre principalmente pela nucleação de trincas de fadiga na superfície do material que avançam pela liga e mudam de direção propagando entre a interface alumínio puro/ aço. O avanço da trinca pode se dar de duas formas: perpendicular à espessura da liga ou diagonalmente à espessura. Isto está esquematizado na próxima figura.

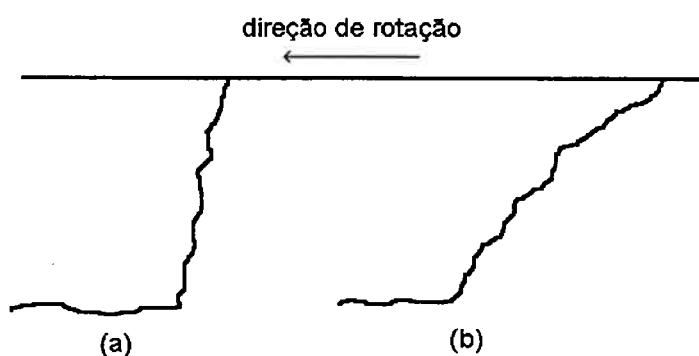


figura 5 - Esquema das duas possibilidades de propagação de trincas na liga de alumínio.

Segundo FUKUOKA (21), estas trincas estão relacionadas com as características do carregamento à qual o material está submetido. No caso (a) o material está submetido a uma carga alternada, típico de motores diesel, e no caso (b) o material é submetido a uma carga rotativa, típico de motores a gasolina, onde as velocidades de rotação são mais

elevadas. Menciona ainda que a solicitação de cargas rotativas é bem mais severa, pois o limite de fadiga obtido em seus ensaios é consideravelmente menor do que no caso de cargas alternativas.

Outra possibilidade é o início da fadiga na interface liga de alumínio com o alumínio puro (20), ocorrendo devido a baixa qualidade desta ligação. Atualmente, na empresa, não ocorre mais este tipo de falha, pois o problema de ligação destas duas camadas foi eliminado, sendo não reportado mais por Sarabanda e Banfield (11, 12).

3.3.4. Propagação de trinca através da liga Al-Sn-Cu

Segundo BUSBY et al (1) testes realizados em amostras em condições paralelas e perpendiculares ao sentido de laminação, obtiveram resultados semelhantes de curvas de crescimento das trincas, ou seja, FCG (Fatigue crack growth).

O crescimento da trinca de fadiga ocorre parte por entre a matriz de alumínio e parte nas partículas de estanho. Em seu trabalho dizem que em ar de laboratório (não seco), a propagação referente à fase de estanho acontece por entre a interface fragilizada alumínio/estanho. Já em ar seco a trinca cresce intergranularmente na fase de estanho, pois não haveria uma interface fragilizada. Ao final, confirmam o que seria de se esperar, que com esta interface fragilizada, a velocidade de crescimento da trinca é maior.

Neste mesmo trabalho ainda estudaram a influência do avanço da precipitação sobre a fadiga da matriz de alumínio. A amostra com grau de envelhecimento menor obteve um resultado melhor pois a distribuição de deformação é mais homogênea o que promove uma melhor reversibilidade da deformação e, portanto, menor acúmulo de dano na ponta da trinca.

3.3.5. A máquina Amsler para ensaio de fadiga

Esta máquina é indicada para a realização de ensaio de fadiga de materiais ferrosos, devido a alta resistência destes materiais, em corpos de prova cilíndricos. Isto justifica o fato desta possuir uma célula de carga para até 100 KN. Para a presente aplicação, esta célula é bastante superdimensionada, o que eventualmente poderá gerar problemas se as recomendações da norma ASTM E 466-82 (2), onde são estabelecidos os limites mínimos e máximos percentuais de carga em relação ao fundo de escala empregado, não forem atendidas.

Outro problema que esta máquina apresenta é o desalinhamento dos dispositivos de fixação, causando uma diferença de tensão entre as faces do corpo-de-prova. Dependendo da gravidade deste problema, a utilização desta máquina poderá ser descartada.

O mecanismo de aplicação de carga nesta máquina é mecânico/eletromagnético, ou seja, a aplicação da carga estática se dá por mecanismo mecânico, enquanto que a carga

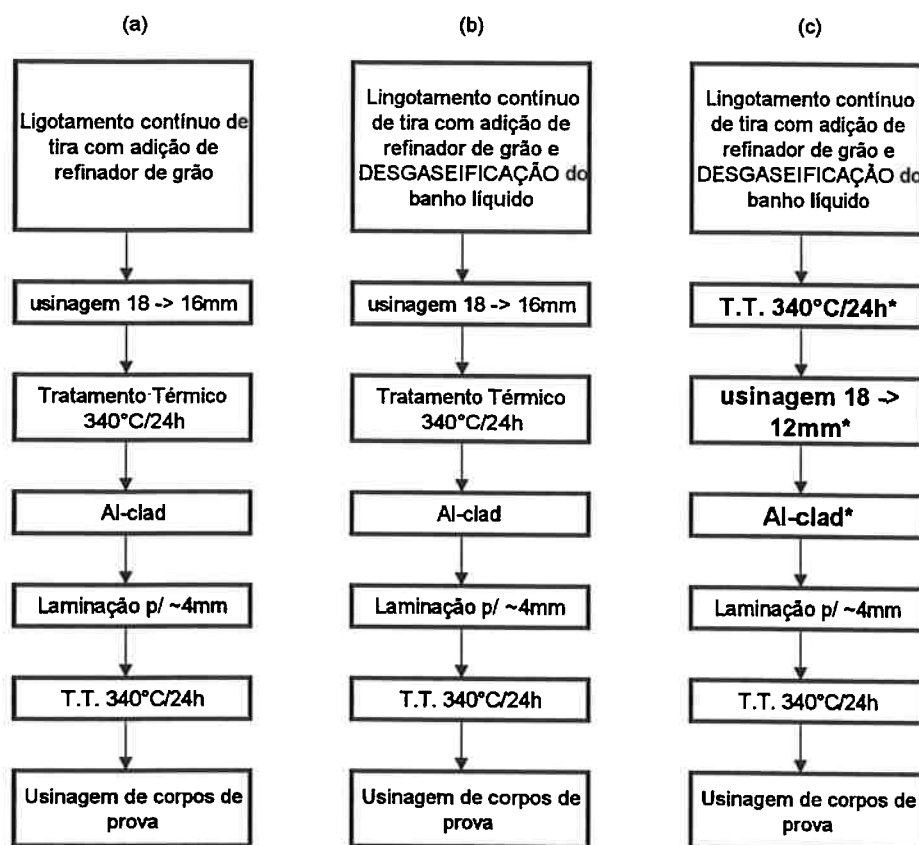
dinâmica é aplicada/mantida por dispositivo eletromagnético.

4. Parte Experimental

A parte experimental deste trabalho pode ser dividida em praticamente três estágios:

- 1) Preparação das amostras nas três versões, para posterior análise;
 - 2) Análise metalográfica do material;
 - 3) Avaliação das propriedades mecânicas deste material.
- Inclui-se nesta parte o desenvolvimento do ensaio de fadiga.

4.1. Preparação das amostras



* Laminação de Al-clad com duplo foll de 1.5mm, para minimizar o suor

Figura 6 - Fluxograma de fabricação dos três tipos de amostras para avaliação.

O fluxograma apresenta a seqüência de produção das três versões das amostras. A seqüência (a) representa o fluxograma de produção atual deste material.

A partir deste procedimento foram introduzidos algumas modificações resultando nos dois outros esquemas.

A seqüência (b) difere de (a) na utilização de desgaseificação do banho líquido no forno de alimentação do lingotamento contínuo. Este procedimento visa retirar partículas de óxido suspensas no banho e que seriam lingotadas conjuntamente com o material da liga. Uma segunda consequência é a retirada de gases do banho, como por exemplo o hidrogênio. O objetivo é obter uma liga mais "limpa" e com isso eventualmente obter propriedades mecânicas melhores.

A linha (c) de amostras visa os mesmos objetivos de (b) e ainda mais a minimização do suor de estanho durante os tratamentos térmicos. Isto se inicia com a inversão da ordem entre os dois passos que seguem o lingotamento: o fresamento (acoplada a linha de lingotamento contínuo) e o tratamento térmico. Invertendo esta ordem pretende-se que a camada de óxido mais espessa evite uma exsudação intensa do estanho, por ser mais espessa do que a formada após o fresamento. Mas outro fator importante é a retirada de 3mm de liga de alumínio após o tratamento térmico, ao contrário do processo atual: 1mm. Este fato pode levar a um melhor rendimento na laminação pois eventuais problemas superficiais podem ser removidos.

Outra nova variável nesta linha é a adoção do Al-clad simultâneo, com tira de alumínio puro de 1,5mm, nas duas faces da liga de alumínio. Atualmente, se faz o Al-clad de um lado da tira, em seguida invertendo-a, e depois fazendo do outro lado. Com o novo processo pode-se ganhar em produtividade e além disso evitar as tensões de cisalhamento decorrentes do Al-clad convencional, no qual há diferença de coeficiente de atrito entre a região superior (cilindro superior/alumínio puro) e a região inferior (cilindro inferior/liga de alumínio-estanho), e que podem gerar trincamento na produção, aumentando as perdas.

4.2. Análise metalográfica

Deverá ser avaliada a microestrutura desta liga, tanto no estado bruto de fusão, quanto no estado final laminado com 4mm de espessura.

4.3. Avaliação das propriedades mecânicas

Esta parte constitui basicamente em determinar as propriedades mecânicas deste material, principalmente a sua resistência a fadiga. Para se estabelecer parâmetros do material deverá ser realizado ensaio de tração das três versões, no estado final do processamento.

Dentro desta etapa tem-se também o desenvolvimento de um ensaio de fadiga, partindo do desenho do corpo-de-prova, passando pela avaliação da máquina e chegando a um ensaio

definido. Nesta definição constarão variáveis como formato e sequência de usinagem e polimento do corpo-de-prova.

5. Resultados e Discussão

5.1. Metalografia

Foi feita a metalografia nas secções longitudinal e transversal de amostras brutas de fusão e no estado final do processamento. A seguir estão as fotografias das microestruturas das amostras.

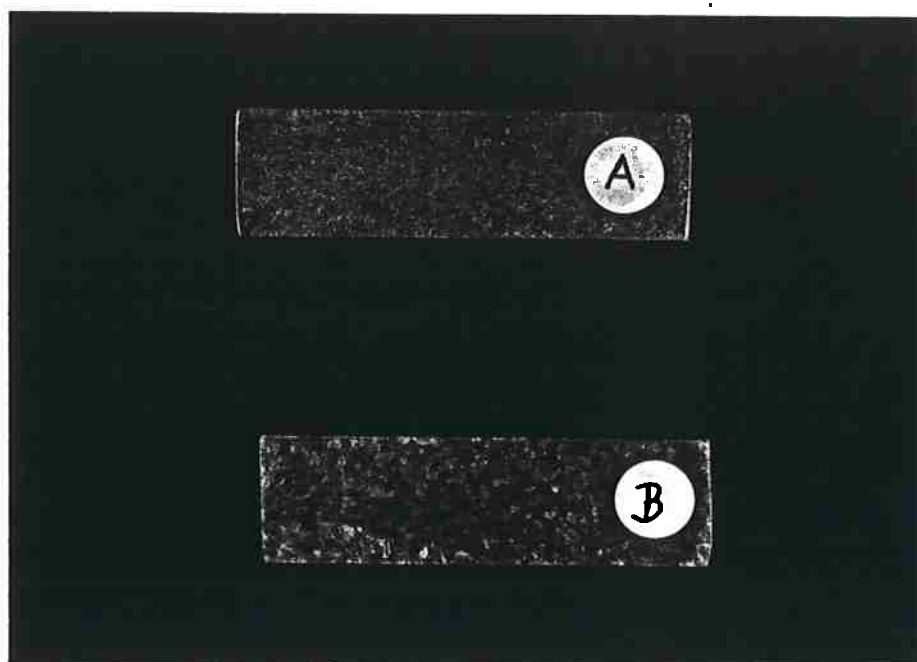


Figura 7 - Fotos das macroestruturas dos materiais brutos de fusão **B**→mat. (a) e **A**→mat. (b). Secção longitudinal. Ataque Keller diluído a 3%.

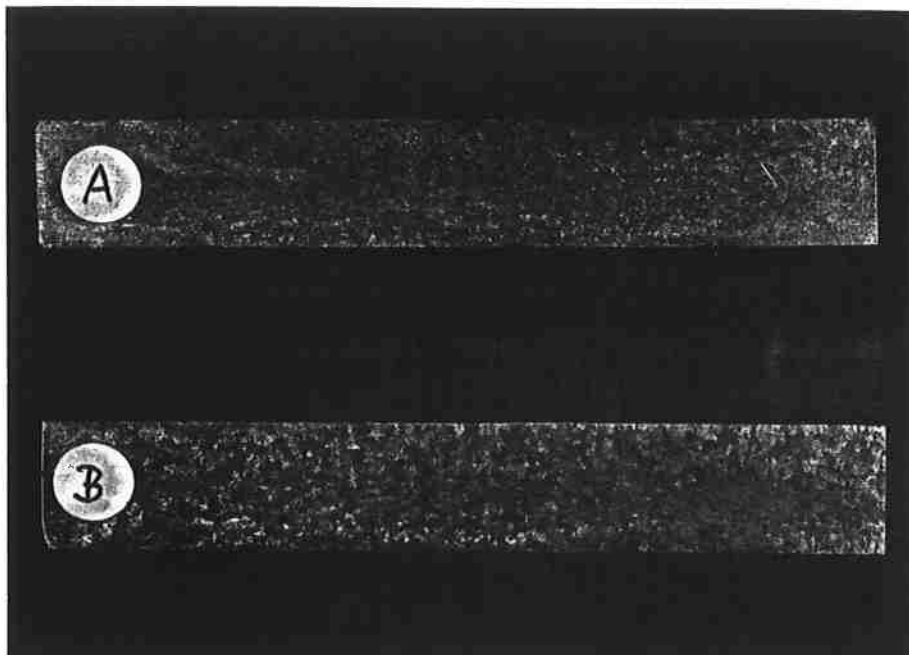


Figura 8 - Fotos das macroestruturas dos materiais brutos de fusão B→
mat. (a) e A→mat. (b) Secção transversal. Ataque Keller diluído a 3%.

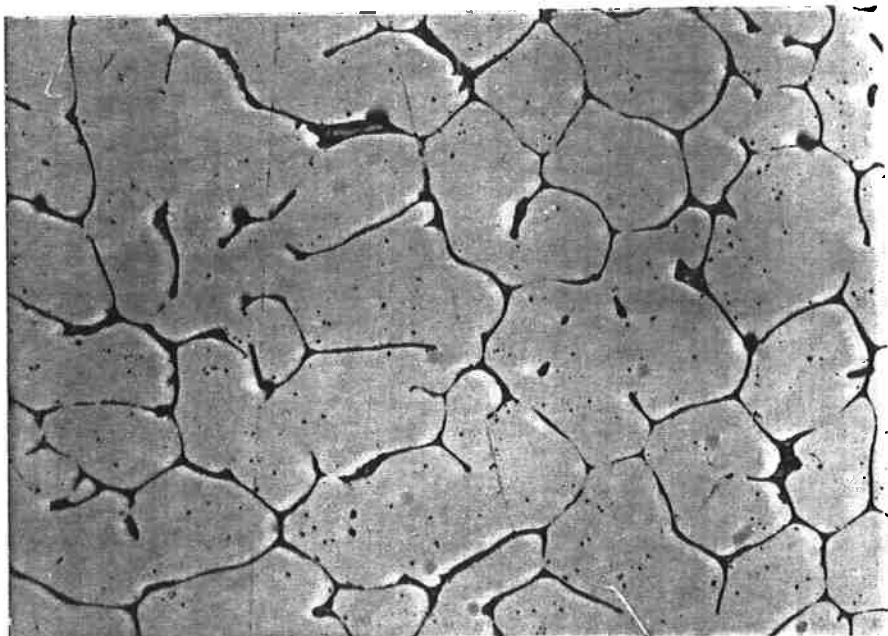


Figura 9 - Material (a) bruto de fusão. Secção longitudinal.
Aumento: 500x. Ataque: Nital 0,5 %.

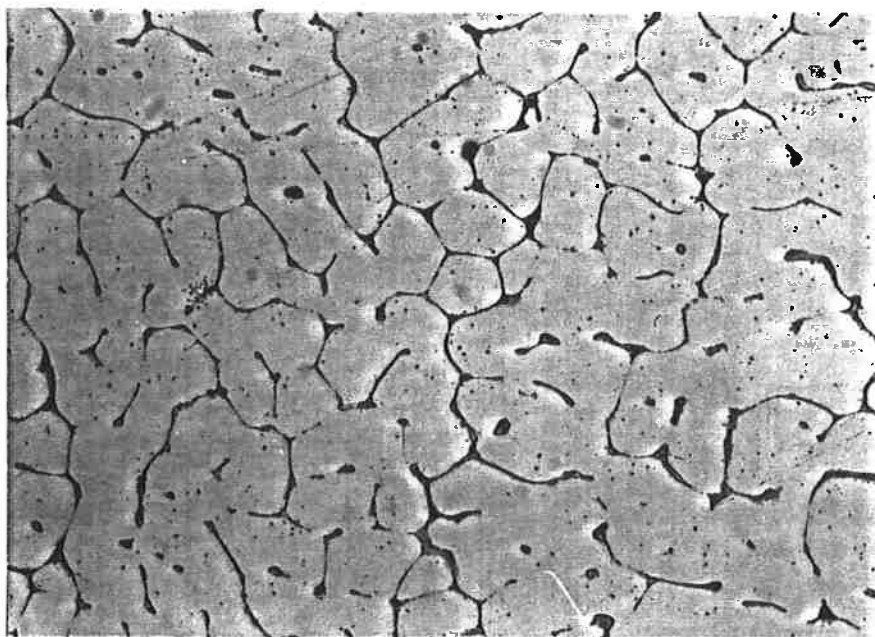


Figura 10 - Material (a) bruto de fusão. Secção transversal.
Aumento: 500x. Ataque: Nital 0,5%.

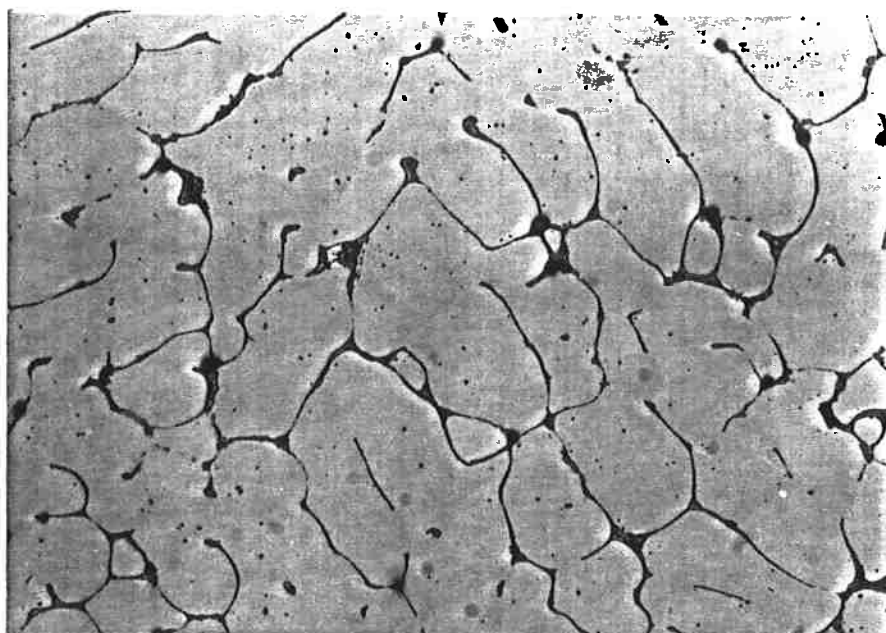


Figura 11 - Material (b) bruto de fusão. Secção longitudinal.
Aumento: 500x. Nital 0,5%.

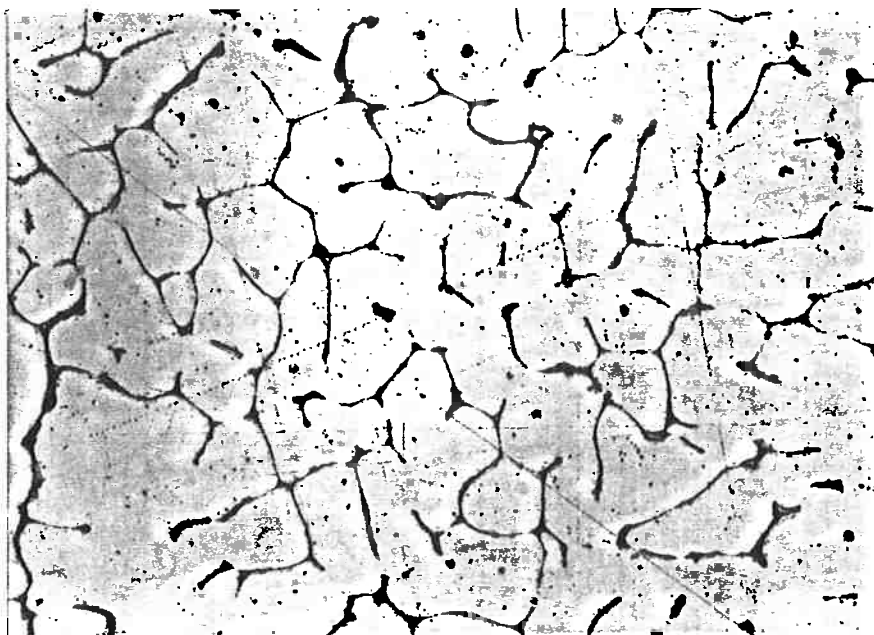


Figura 12 - Material (b) bruto de fusão. Secção transversal.
Aumento: 500x. Ataque: Nital 0,5%.

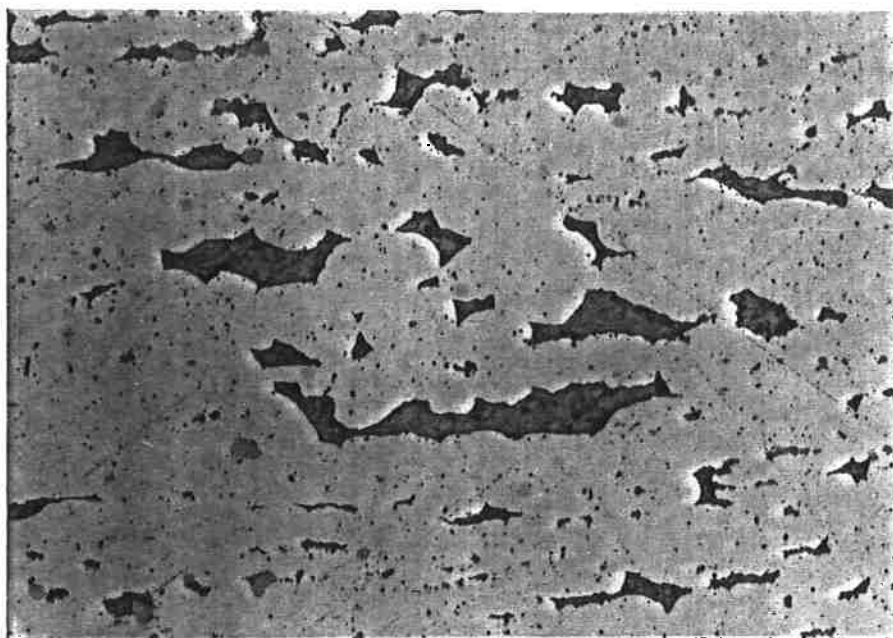


Figura 13 - Material (a) no final do processamento. Secção longitudinal. Aumento: 500x. Ataque: Nital 0,5%.

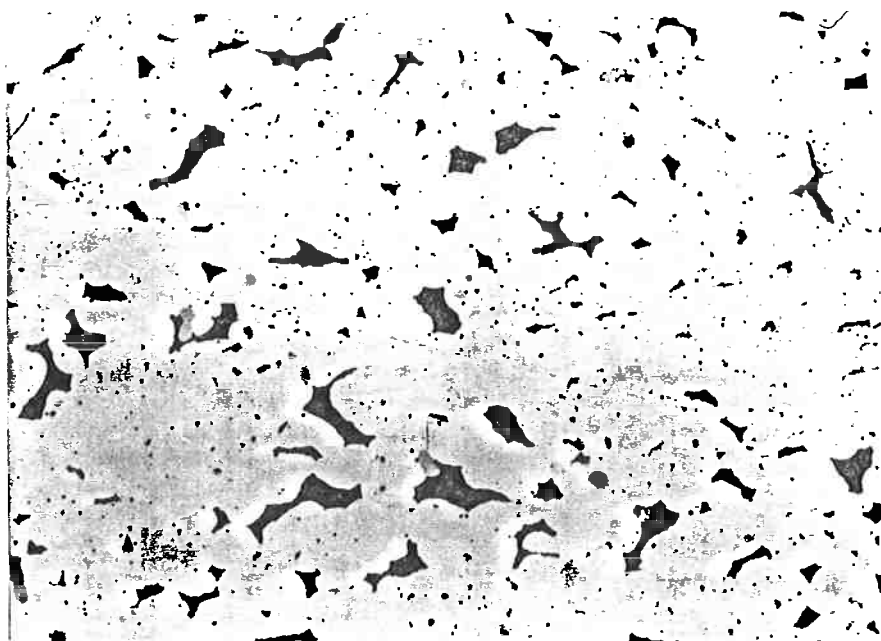


Figura 14 - Material (a) no final do processamento. Secção transversal. Aumento: 500x. Ataque: Nital 0,5%.

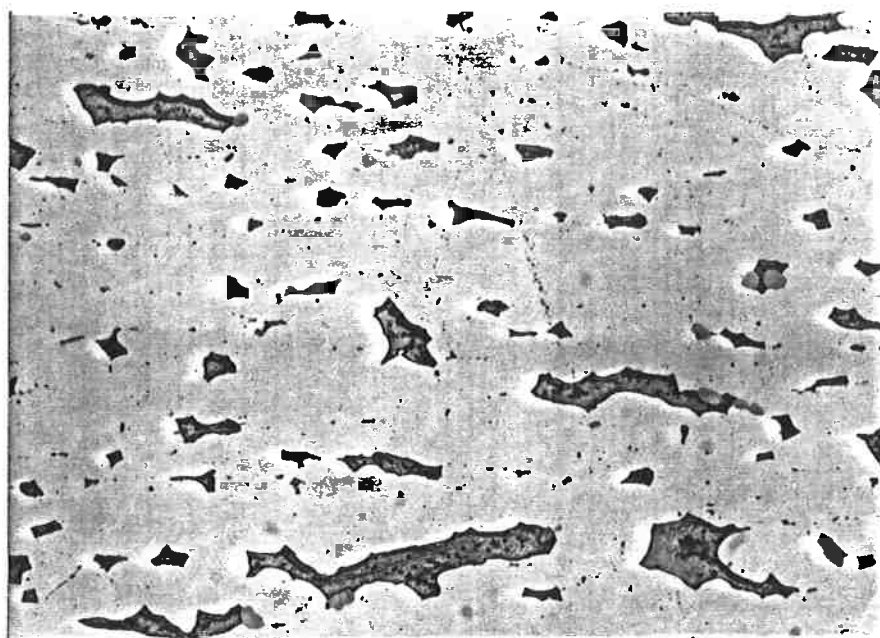


Figura 15 - Material (b) no final do processamento. Secção longitudinal. Aumento: 500x. Ataque: Nital 0,5%.

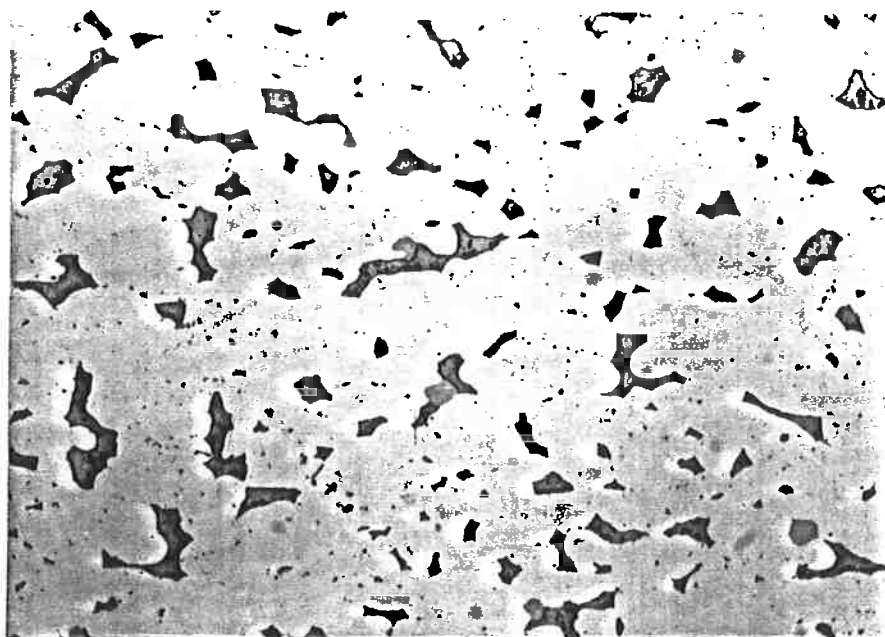


Figura 16 - Material (b) no final do processamento. Secção transversal. Aumento: 500x. Ataque: Nital 0,5%.

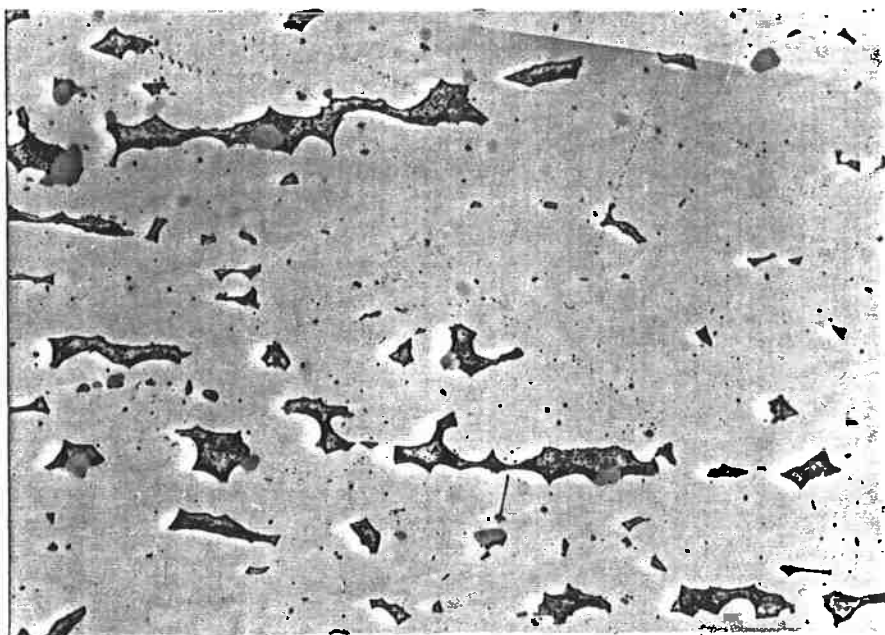


Figura 17 - Material (c) no final do processamento. Secção longitudinal. Aumento: 500x. Ataque: Nital 0,5%.

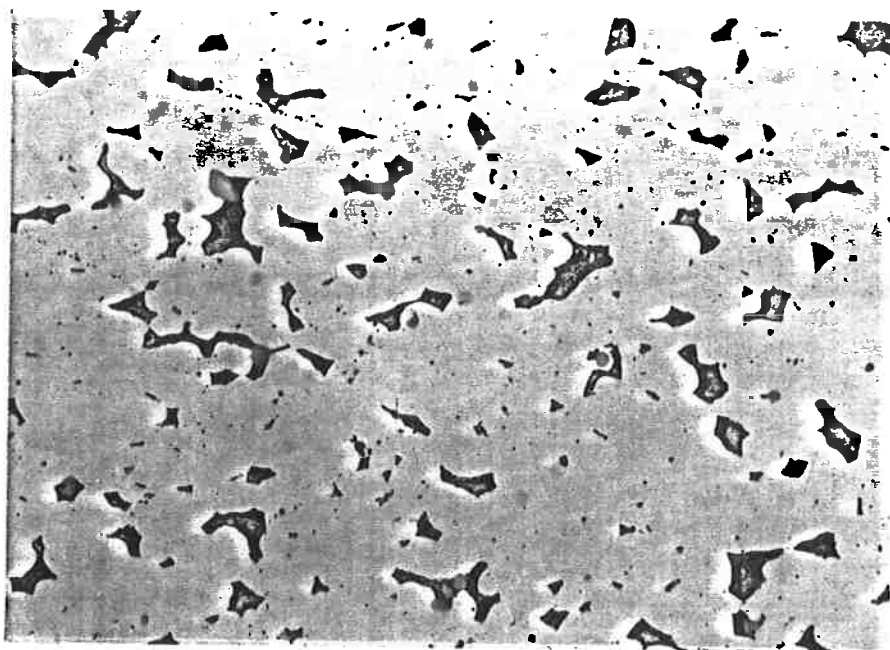


Figura 18 - Material (c) no final do processamento. Secção transversal. Aumento: 500x. Ataque: Nital 0,5%.

Como os materiais (b) e (c) são semelhantes no estado bruto de fusão, foi feita preparação de somente um deles.

Vê-se nas macrografias (figuras 7 e 8) que o material (b) não revelou a estrutura nitidamente como o material (a), mesmo após ser preparado várias vezes, ou seja, polido e atacado várias vezes sucessivas. Em exame visual notou-se que o material (b) apresentava uma microestrutura mais refinada em relação ao (a).

Nas micrografias do material bruto de fusão (figuras 9 a 12) pode-se ver a microestrutura característica deste material, como já havia sido descrito anteriormente, que consiste basicamente de grãos de alumínio praticamente puro envoltos pela fase, praticamente pura, de estanho.

Nas figuras 14 a 18 tem-se a microestrutura dos três materiais na condição final. Pode-se observar nas secções longitudinais pequeno alinhamento da fase rica em estanho, decorrente da laminação deste material. Nota-se também que o estanho envolve parcialmente os contornos de grão de alumínio, devido ao tratamento térmico, que forneceu condições para a sua fusão, durante a qual se distribuiu ao longo dos contornos.

Em relação ao tamanho de grão das amostras finais, é difícil de ser obtido, pois há uma tendência de ataque generalizado e também localizado, principalmente, na fase rica em estanho, sem, no entanto, revelar os contornos de grão. Foram feitas algumas tentativas, mas sem sucesso.

5.2. Propriedades mecânicas

5.2.1. Tração

Os resultados do ensaio de tração das três versões de material, feita no estado laminado (final do processamento), estão apresentados na figura 19.

Material	Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
(a)	52,1 ± 1,9	104,4 ± 6,0	23,3 ± 3,0	67,2 ± 4,7
(b)	55,6 ± 5,5	107,1 ± 4,3	18,7 ± 3,2	70,5 ± 3,4
(c)	56,7 ± 4,7	116,6 ± 6,0	21,7 ± 1,4	72,0 ± 2,3

Figura 19 - Resultado do ensaio de tração.

Não há grandes diferenças entre os três materiais, apesar destes resultados serem crescentes em direção (a)→(b)→(c). Estatisticamente, eles pertencem à mesma população.

5.2.2. Fadiga

Até agora não havia um ensaio de fadiga de tiras semi-acabadas dentro da empresa. Logo a tarefa era desenvolvê-lo. A primeira etapa consistiu em elaborar o corpo-de-prova seguindo as recomendações da norma (2), no que fosse possível. A partir disto obteve-se o corpo-de-prova esquematizado a seguir:

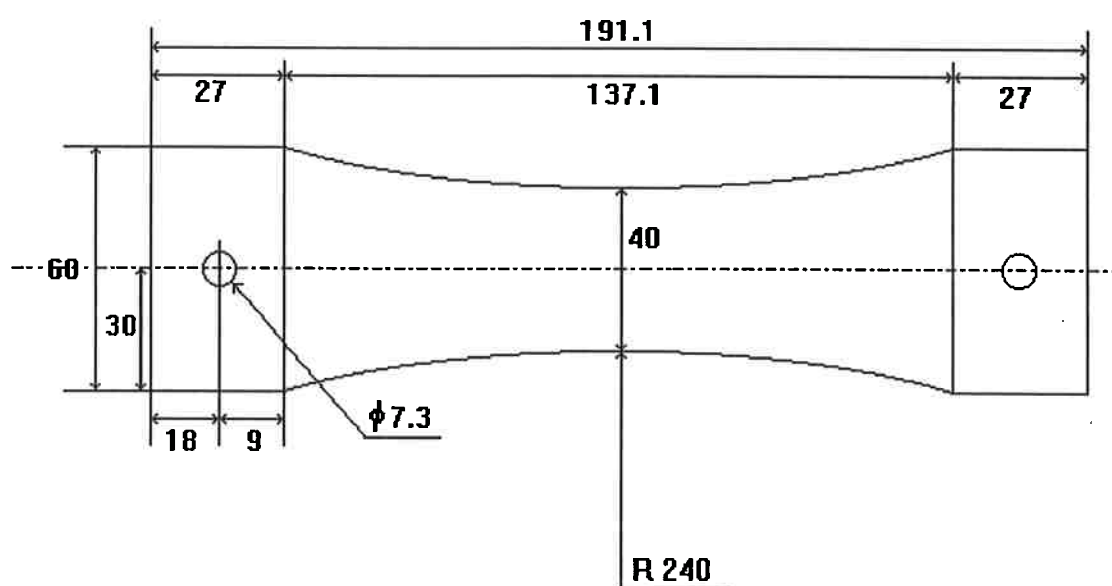


Figura 20 - Esquema de corpo-de-prova para ensaio de fadiga. Desenho não está em escala. Dados em milímetros. Espessura 2,5 mm.

Em relação à norma este corpo-de-prova está em desacordo em três pontos básicos:

1) A norma especifica que o raio (no caso 240 mm) deveria ser no mínimo oito vezes a largura da região de testes. Foi utilizado seis vezes. Esta modificação foi sugerida e aceita na época de início dos primeiros ensaios. Sabe-se que a utilização de um raio menor pode levar a um aumento

do K_t . Provavelmente, este valor deva novamente ser elevado para oito.

2) A relação largura/espessura do cp. deveria estar entre 2 e 6, sendo que foi utilizado 16. Isto não é possível de ser evitado, pois tem-se a limitação de espessura, ou seja, tem-se que o material bruto de fusão deve ser trabalhado com certa intensidade para garantir a quebra da estrutura. Associado ainda a este problema, tem-se o fundo de escala elevado da máquina, o que influenciou decisivamente na elaboração do desenho do cp., mais especificamente na área da secção de ensaio.

3) A norma não especificava a existência de um furo, que, no caso, serve tanto como método de fixação na usinagem quanto como fixação no ensaio.

Um ponto não abordado na norma é a utilização de cantos vivos ou arredondados, na secção transversal da região ensaiada no corpo-de-prova. Sabe-se que qualquer mudança brusca de geometria introduz concentração de tensão e portanto pode nuclear a fadiga. Como quer-se medir as propriedades do material e não a influência da geometria, seria razoável a utilização de cantos arredondados, embora isto torne a preparação consideravelmente mais difícil, já que o arredondamento deve ser padronizado e o resultado desta operação repetitiva.

O desenvolvimento do dispositivo de fixação para cp. de secção retangular ocorreu paralelamente com o desenvolvimento do corpo-de-prova. Optou-se por um sistema

de fixação através de duas superfícies paralelas, que teriam a função de atuar como mordente, transmitindo a carga não somente pelo furo, mas principalmente pela face, evitando assim a fadiga na região da descontinuidade (furo). Abaixo está esquematizado o dispositivo de fixação. Tem-se a parte plana, onde se apoia o cp.: a linha fina representa a projeção do corpo-de-prova sobre o dispositivo, e a região cilíndrica, onde há a rosca para fixação deste dispositivo à máquina.

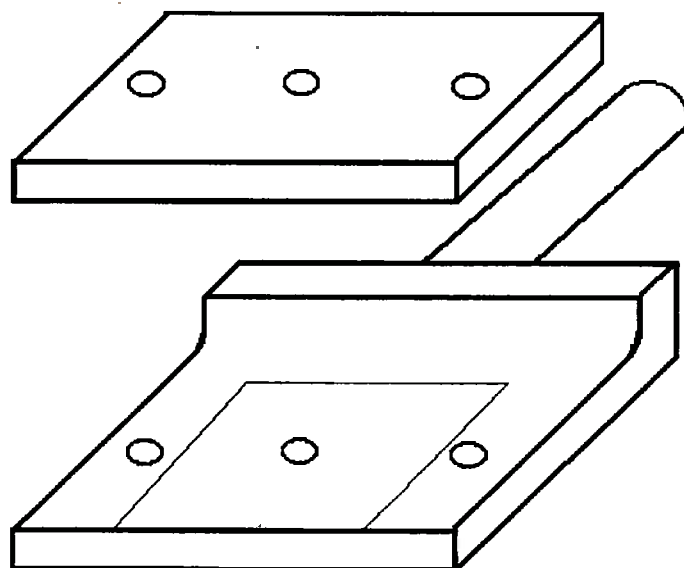


Figura 21 - Esquema do dispositivo de fixação.

Estando definido a geometria. foram confeccionados dez cps., sendo que um foi montado com extensômetros, para verificação do alinhamento da máquina. Já era conhecido o fato dela possuir uma desalinhamento entre as garras superior e inferior.

A intenção era posicionar a espessura do cp. paralela a linha projetada entre os centros das garras. Com isso,

desde que o desalinhamento não fosse demasiado, poder-se-ia manter as diferenças máximas de tensão em valores muito pequenos. Na figura seguinte está colocado um esquema ilustrativo da ideia.

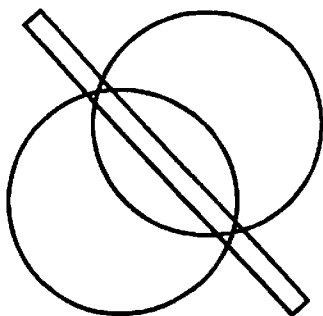


Figura 22 - Esquema ilustrativo de como contornar o problema de desalinhamento das garras. Vista superior.

Nesta primeira fase dos ensaios utilizou-se inicialmente cps. bruto e em segunda instância cps. polidos. A preparação completa dos corpos-de-prova ficou definido como segue:

- Para produzir corpos-de-prova com espessura de $2,5 \pm 0,1\text{mm}$, as tiras com 4mm deveriam ser usinadas para 3,2mm, seguindo as recomendações do apêndice da norma(2) e depois lixadas em aparelho Maximet (para preparação de amostras metalográficas), nas granas 120, 240, 400 e 600, seguindo o mesmo conceito utilizado no polimento de amostras metalográficas, ou seja, remover as regiões de encruamento (causado pela lixa) na grana posterior, sendo o acabamento final feito com pasta de diamante de 1mm. Nos raios o lixamento foi feito manualmente seguindo o mesmo conceito, e para o acabamento final foi utilizado um disco

de feltro de 300mm de diâmetro acoplado a um motor elétrico e óxido de cromo como abrasivo.

De posse dos corpos-de-prova, passou-se para a etapa de avaliação da máquina. Foram feitas então uma série carregamentos. Variou-se a posição do corpo-de-prova e determinou-se aquela onde a diferença de tensões era a menor. Os resultados das medições indicaram que a diferença nesta posição era inferior a 5% do carregamento total, de acordo com que a norma (2) recomenda.

Estando esta etapa definida prosseguiu-se para os ensaios preliminares. A princípio utilizou-se o furo central somente com um pino, e os laterais com parafusos e porcas, dando estes efetivamente o aperto. Fato é que mesmo sendo de aço, o dispositivo fletiu o suficiente, para causar dano às laterais do corpo-de-prova, possibilitando o início da fadiga nesta região. Além disto a flexão impediu o bom contato entre as duas superfícies (cp./dispositivo). Isto se torna claro na figura a seguir.

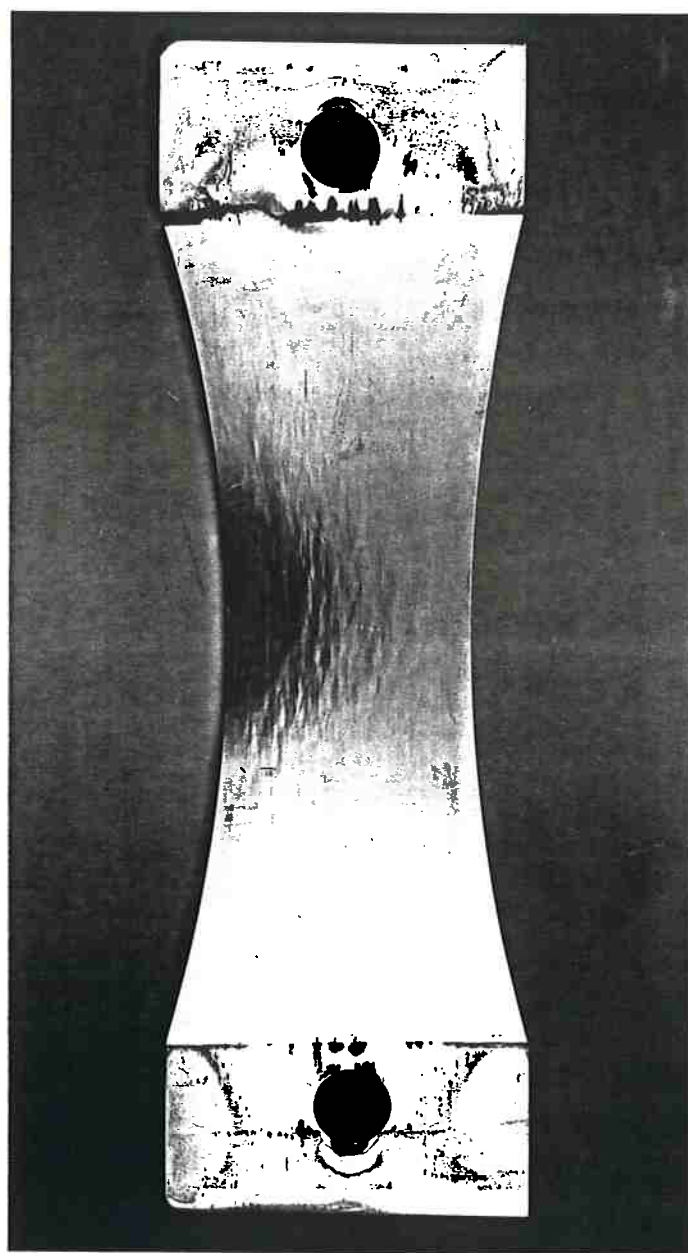


Figura 23 - Foto de corpo-de-prova ensaiado, mostrando a fadiga no final do dispositivo e as marcas da região onde houve contato efetivo.

Notando este problema, resolveu-se então apertar também a região central, trocando o pino por um conjunto porca-parafuso. Mesmo após esta modificação não obteve-se

resposta e o corpo-de-prova continuava rompendo ao final do dispositivo, nas regiões laterais.

Concomitante com estes ensaios, notou-se que embora o material rompesse em local indesejado, a ciclagem até a ruptura era muito elevada, chegando a $1,5 \times 10^7$ com cargas elevadas, e a frequência variava de 100Hz (considerado normal) a valores de mais de 400Hz, considerado improvável. Isto levantou a suspeita da integridade funcional da máquina. Foi feita a verificação da parte eletrônica, e constatou-se que vários componentes estavam danificados, necessitando a troca imediata, o que efetivamente ocorreu. Mas apesar disto o problema persistia.

Observando mais atentamente a máquina, notou-se que os picos de frequência aconteciam durante o funcionamento do ar-condicionado da sala, colocado perto da máquina e ligado a mesma rede elétrica. Foi tomada providência para que a máquina fosse ligada em outro ramo da rede elétrica, que possuía um estabilizador de grande porte, ao contrário daquele utilizado anteriormente, exclusivo desta máquina. Após nova verificação constatou-se que a medida foi bastante eficaz.

Em relação ao problema de rompimento do corpo-de-prova ao final do dispositivo, tomou-se a seguinte atitude: apertar os parafusos de forma menos intensa evitando que o dispositivo danifique o corpo-de-prova. A partir deste instante, ensaiando um corpo-de-prova bruto, obteve-se o resultado desejado, mas que não se repetiu com cp polido.

Devido a isto está se avaliando melhor o problema para elaborar soluções.

Infelizmente, a quantidade de problemas que surgiram afetaram o cronograma estabelecido, e portanto impediu que se tivesse os resultados na data de elaboração deste relatório. Apesar disto o ensaio de fadiga está bastante avançado. Com a solução do problema, poderá se passar à próxima fase: de avaliação dos resultados e discussão quanto à necessidade de arredondamento do cantos na região de teste.

6. Conclusões

Apesar de não obter resultados de fadiga, que era o principal, pode-se dizer que a máquina Amsler está praticamente pronta para ser utilizada na avaliação da resistência a fadiga deste conjunto de materiais (3 linhas). A maioria dos problemas que surgiram eram imprevisíveis, sendo possível que no futuro fatos análogos se repitam.

Em relação ao desenho do corpo-de-prova pode-se fazer a seguinte consideração: provavelmente para se medir alguma diferença entre os três materiais deverá ser adotado um arredondamento dos cantos vivos, por estes representarem uma descontinuidade muito acentuada, levando à fadiga o material. Com isso estarariam sendo avaliadas as condições geométricas e não intrínsecas do material.

Com certeza o processo de fadiga em uma bronzina, não é simples, logo isto significa que mesmo obtendo resultados superiores num material pode não haver melhora na resistência a fadiga da peça com este material, devido a fatores determinantes não analisados.

7. Referências bibliográficas

- 1) BUSBY, A. K. & MARTIN, J. W. "Fatigue crack propagation in Al-Sn bearing alloys", Materials Science and Technology, Volume 5, Julho 1989, pg 689-698.
- 2) Norma ASTM E 466-82, Assunto: Condução de testes de fadiga axiais com amplitude constante em materiais metálicos.
- 3) DESVAUX, M. P. E. "Development of a high-tin aluminium plain bearing material", Tribology, April 1972, pg 61-66.
- 4) GEE, A. W. J. "Aluminium-base bearing metals", Aluminium, 54 (4), 1978.
- 5) HODES, E. & STEEG, M. "Aluminium as a material for shell bearings", Aluminium, 56 (4) ,1980, pg 261-264.
- 6) PRATT, G. C. "New Developments in Bearings Materials", SAE Technical Paper 690112.
- 7) MONDOLFO, L. F. "Aluminum Alloys - Structure & Properties", Butterworth & Co, 1976 pg 516.
- 8) DIETER, G.E. "Mechanical Metallurgy" MC GRAW-HILL BOOK COMPANY, Nova Yorke, 1961, pg 296-334.

- 9) OGITA, Y. & NIWA, K. & KONDO, Y. "New Type Fatigue Phenomenon of Aluminium-Based Engine Bearings", SAE Technical Paper 890556.
- 10) HOLLANDER, M. & BRYDA, K. A. "Interpretation of engine Bearing Performance by Journal Orbit Analysis", SAE Technical Paper 830062.
- 11) BANFIELD, R. R. & SARABANDA, J. V. Assunto: modo de falha em casquilhos, Relatório Técnico Metal Leve, Número 216.039, 28-10-92.
- 12) SARABANDA, J. V. & BANFIELD, R. R. Assunto: falha de um casquilho em um motor, Relatório Técnico Metal Leve, Número 383.009, 22-04-92.
- 13) Metals Handbook "Materials for sliding bearings", 9ª Edição, Volume 3 , ASM, 1980, pg 802-822.
- 14) Metals Handbook "Sleeve bearing materials", 8ª Edição, Volume 1, ASM, 1961, pg 843-864.
- 15) Silva, P.S.C.P. "Utilização do método da partição da deformação na avaliação da resistência à fadiga de juntas soldadas do tipo HY-80, com e sem defeitos internos no material depositado", São Paulo, Universidade de São Paulo, 1984. (Tese de Livre Docência) pg 1-25.

- 16) Aulas de PMT-482 e PMT-483 - Mecânica dos materiais metálicos, administradas pelo Professor Paulo Sérgio C. P. da Silva, Professor Titular da Escola Politécnica da USP.
- 17) LAIRD, C. "Cyclic deformation, Fatigue crack nucleation and propagation in metals and alloys", Metallurgical Treatises, The Metallurgical Society of AIME, June 1981, p 505-527.
- 18) SILVA, P.S.C.P. da "Relações Estrutura/Propriedades Mecânicas de materiais metálicos: tenacidade e resistência à fadiga" texto a ser publicado em Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.
- 19) Metals Handbook "Binary Phase Diagrams", Volume 8, 9ª Edição, ASM, 1973, pg 259 e 263.
- 20) RAMOS, J.O. & KAUFMANN, M. ASSUNTO: Melhora em uma liga de alumínio para casquilhos. Relatório Técnico Metal Leve, Número 383.013, 15-04-91.
- 21) FUKUOKA, T.; KATO, H.; KAMIYA, S. & SODA, N. "Fatigue and life of plain bearings under alternating or rotating loads", Proceedings of the JSLE International Tribology Conference 1985, Tokyo, pg 91-96.