

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2003



1110000524



***"Estudo do Comportamento das
Ligas de Alumínio-Magnésio
AlMg 5083 e AlMg 5182,
Sob Solicitação em Fadiga Axial"***

VALDIR CHUMSKI

210



CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO
DAS LIGAS DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO
AlMg 5083 E AlMg 5182,
SOB SOLICITAÇÃO EM FADIGA AXIAL**

VALDIR CHUMSKI

BIBLIOTECA
DE GUARATINGUETÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita filho", Campus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica (Área de Concentração: Projetos e Materiais).

Orientador: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres.

Co-Orientador: Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald

**Guaratinguetá - SP
2003**

524



Chumski, Valdir
C559e Estudo do comportamento das ligas de alumínio-magnésio AlMg 5083
e AlMg 5182, sob solicitação em fadiga axial / Valdir Chumski. -
Guaratinguetá : [s.n.], 2003
110 f. : il.

Bibliografia: f. 94-96
Inclui apêndice
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Engenharia de Guaratinguetá, 2003
Orientador: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres

1. Fadiga I. Título

CDU 620.178.3

**“ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS LIGAS DE
ALUMÍNIO-MAGNÉSIO AlMg 5083 E AlMg 5182,
SOB SOLICITAÇÃO EM FADIGA AXIAL”**

VALDIR CHUMSKI

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

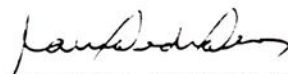
**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. MARCELO AUGUSTO SANTOS TORRES
Unesp-Feg



Prof. Dr. ANSELMO MONTEIRO ILKIU
UNITAU

Abril de 2003

DADOS CURRICULARES

VALDIR CHUMSKI

Nascimento 09 de agosto de 1953.

Natural de: Ourinhos - SP.

Filiação João Chumski
Melânia Gurtovenco Chumski

1998 Pós Graduação em Engenharia de Qualidade.
Faculdade de Engenharia Química de Lorena - FAENQUIL.
Lorena - SP.

1980 Graduação em Engenharia Mecânica.
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"- UNESP.
Guaratinguetá - SP.

1973 Técnico em Eletromecânica.
Colégio Técnico Industrial Estadual de Ourinhos.
Ourinhos - SP.



A Deus,
pela minha consciência,
pela minha saúde,
pelas minhas amizades,
pela minha família,
pelos meus conhecimentos e
pelos meus clientes.

A meu querido filho Ivan.

A minha querida esposa Magda.

A minha família.

AGRADECIMENTOS

Na realização desta pesquisa científica, muitas coisas e pessoas fizeram parte do trabalho, portanto, de uma forma generalizada reconheço e agradeço a tudo e a todos, no entanto, algumas pessoas e instituições contribuíram significativamente e têm a minha gratidão, especialmente:

à FEG-UNESP, por mais esta oportunidade.

à ALCAN, na pessoa do Gerente Técnico o eng. Sr. Edgard L. Penteado Neto.

à CAPES pela bolsa de mestrado.

ao DEMAR - pela utilização do microscópio eletrônico de varredura e por permitir a execução da laminação por várias vezes.

ao DMT, pelos ensinamentos, oferecimento de infra-estrutura, técnicos, funcionários e professores.

ao meu amigo, co-orientador desta pesquisa e coordenador de projeto em políticas públicas, Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald.

ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Mauro Pedro Peres.

ao meu amigo, Prof. Dr. Antonio Fernando Branco, pelo abrigo.

ao meu amigo, Ms. Marcelino Pereira do Nascimento, pela colaboração.

ao Prof. Dr. Carlos A. Baldan, pela colaboração no processo de laminação.

ao Dr. Luis Fernando Godoy Cappio, pela deferência.

ao meu amigo e conterrâneo Dr. David Cintra Leite, pelo apoio.



APOIO FINANCEIRO

Esta pesquisa teve apoio financeiro para o pesquisador,
através de bolsa de mestrado da:
CAPES.



“O bom senso é a coisa melhor dividida no mundo, pois cada um se julga tão bem dotado dele que ainda os mais difíceis de serem satisfeitos em outras coisas não costumam querê-lo mais do que têm”.

RENÉ DESCARTES



CHUMSKI, V., *Estudo do comportamento das ligas de alumínio-magnésio AlMg 5083 e AlMg 5182, sob solicitação em fadiga axial*, Guaratinguetá, 2003, 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

A maioria das solicitações em componentes de sistemas mecânicos, em quaisquer aplicações, está diretamente ligada a solicitações dinâmicas cíclicas. Portanto, conhecer o comportamento em fadiga desses materiais de interesse é fundamental para um projeto bem sucedido. Por outro lado, os fabricantes procuram oferecer seus produtos com a melhor qualidade em relação a seus concorrentes por um valor igual ou menor, entregá-los no prazo e buscar flexibilidade no processo de fabricação para manterem-se no mercado. Diante disso, a Alcan, cumprindo metas de sua política de qualidade, passa a fornecer um só tipo de liga de alumínio-magnésio, dentre duas de características técnicas semelhantes, ou seja: fabricar somente a liga AlMg 5182 e deixar de processar a liga AlMg 5083. O objetivo desta decisão é passar de uma fabricação intermitente para uma contínua. Como ainda não se conhecem os comportamentos em fadiga destas ligas para compará-las, esta pesquisa vem ao encontro desta necessidade, formalizando uma interação científica entre empresa e universidade. Diante desta premissa, a pesquisa abrange uma metodologia que engloba parte do processo de obtenção da matéria prima, a confecção de corpos de prova, ensaios de dureza e ensaios de fadiga axial para as duas ligas em condições variadas de têmperas e anisotropia. Pode-se admitir também que a pesquisa é uma combinação lógica de ensaios não-destrutivos, usinagem, tratamentos térmicos e ensaios destrutivos. Esta pesquisa fornecerá quais fatores são significativos no comportamento destas ligas em fadiga axial e, no caso específico, quais alterações serão provocadas, utilizando-se a liga AlMg 5182 em substituição à AlMg 5083.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga, AlMg 5083, AlMg 5182.



CHUMSKI, V. *Study of the behavior of the aluminum-magnesium alloys AlMg 5083 and AlMg 5182, under solicitation to axial fatigue*, Guaratinguetá, 2003, 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

The majority of requests for mechanical system components directly reflects cyclic ordering dynamics, therefore, to know the fatigue behavior of involved materials is of fundamental importance to produce successful, high standard products. On the other hand, manufactures are always attempting to produce items of the highest quality, lowest prices, meeting promised delivery dates while maintaining needed manufacturing flexibility to incorporate the latest production technologies in order to successfully and profitably win a slice of the market. Therefore Alcan, meeting quality policies objectives, will initiate delivery of only AlMg 5182 Aluminum-Magnesium alloy, and will discontinue production of type AlMg 5083 alloy. The objective of this move is to substitute a intermittent production line for a less costly continuous one. As the fatigue behavior of these alloys is yet unknown, this project proposes to fulfill this need, facilitating profitable scientific interactions between university and manufacturer. Facing this premise, this research will include suggestions of cost effective methods of raw material procurement, elaboration of test samples, hardness and axial testes of both alloys in several thermal and anisotropy conditions. The project can also be thought of as being a logic combination of destructive and non-destructive testing coupled with various thermal treatments and machining technics. It will also show those significant factors in the behavior of these alloys principally when axial fatigue aspects are considered and specifically what will be the effects of substituting AlMg 5083 by AlMg 5182 alloy.

KEYWORDS: Fatigue, AlMg 5083, AlMg 5182.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	OBJETIVO.....	19
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1	O ALUMÍNIO PRIMÁRIO.....	21
2.2	O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	24
2.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A IMPORTÂNCIA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO NAS INDÚSTRIAS.....	28
2.4	O ESTADO DA ARTE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO, AlMg 5083 E AlMg 5182.....	29
2.5	FADIGA.....	33
2.5.1	Características estruturais da fadiga.....	34
2.5.2	Curvas σ -N	35
2.5.3	Ciclo de tensões.....	37
2.5.4	Fatores que influenciam no comportamento em fadiga.....	38
2.6	CRITÉRIOS DE PROJETO PARA SOLICITAÇÕES EM CARREGAMENTOS CÍCLICOS.....	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1	PROCESSO BÁSICO PARA OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	44
3.2	MATERIAIS.....	47
3.3	MÉTODOS.....	52
3.3.1	Descrição do processo passo a passo.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DAS LIGAS AlMg 5083 E 5182	72

4.2	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5182, NA TÊMPERA “O”	73
4.3	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5182, LONG., H32.....	74
4.4	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5182, TRANSV., H32.....	75
4.5	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5182, LONG., H34.....	76
4.6	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5182, TRANSV., H34.....	77
4.7	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5083, NA TÊMPERA “O”	78
4.8	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5083, LONG., H32.....	79
4.9	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5083, TRANSV., H32.....	80
4.10	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5083, LONG., H34.....	81
4.11	RESULTADOS DOS ENSIAOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5083, TRANSV., H34.....	82
4.12	ORGANIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS PARA SELEÇÃO DAS CURVAS A SEREM COMPARADAS	83
4.13	TIPOS DE CURVAS (FADIGA AXIAL).....	84
4.14	DISCUSSÃO.....	90
5	CONCLUSÕES	91
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
	APÊNDICES.....	97
	ANEXOS	108

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Rendimento na obtenção do alumínio primário.....	22
FIGURA 2	Processo de reciclagem das latas de ligas de alumínio.....	23
FIGURA 3	Diagrama de equilíbrio das ligas de alumínio-magnésio.....	29
FIGURA 4	Representação da distribuição das tensões numa trinca.....	34
FIGURA 5	Conceito de Wood: (a) deformação estática; (b) deformação de fadiga originando intrusão e (c) deformação de fadiga originando extrusão.....	35
FIGURA 6	Curvas de fadiga para metais ferrosos e não ferrosos	36
FIGURA 7	Ciclos de tensões em fadiga: (a) tensão alternada; (b) tensão flutuante; e (c) tensão aleatória.....	37
FIGURA 8	Efeito de vários tipos de concentradores de tensão na vida em fadiga nos corpos de prova submetidos a ensaios destrutivos.....	40
FIGURA 9	Ciclo básico da laminação do alumínio e das suas ligas.....	46
FIGURA 10	Simbologia básica para processo produtivo.....	52
FIGURA 11	Fluxograma do processo de fabricação e método de ensaio de fadiga axial.....	53
FIGURA 12	Matéria-prima: ligas de AlMg 5083 , e AlMg 5182.....	54
FIGURA 13	Vista frontal de material a ser laminado.....	55
FIGURA 14	Representação esquemática da 1ª laminação.....	56
FIGURA 15	Laminador Fenn Manufacturing Newington Connecticut	57
FIGURA 16	Forno Degussa-Durferit KO.....	58
FIGURA 17	Curva de recozimento para ligas de alumínio-magnésio.....	58
FIGURA 18	Representação esquemática da 2ª laminação.....	59
FIGURA 19	Aparelho para ensaio de dureza.....	61
FIGURA 20	Dimensões dos corpos-de-prova, para ensaio de tração.....	61
FIGURA 21	Dimensões da região a ser rompida no ensaio de tração.....	62
FIGURA 22	Dimensões dos corpos-de-prova para ensaios de fadiga axial.....	65
FIGURA 23	Forno para tratamento térmico EDG-7000.....	66

FIGURA 24	Curva de estabilização das ligas alumínio-magnésio (H32 e H34)..	67
FIGURA 25	Maquina para ensaio de fadiga axial.....	70
FIGURA 26	Representação das resistências de fadiga axial da liga 5182, na condição “O”, com relação às têmperas “H32” e “H34”	73
FIGURA 27	Curva de fadiga axial da liga AlMg 5182, têmpera H32, long.....	74
FIGURA 28	Curva de fadiga axial da liga AlMg 5182, têmpera H32, transv.....	75
FIGURA 29	Curva de fadiga axial da liga AlMg 5182, têmpera H34, long.....	76
FIGURA 30	Curva de fadiga axial da liga AlMg 5182, têmpera H34, transv.....	77
FIGURA 31	Representação das resistências de fadiga axial da liga 5083, na condição “O”, com relação às têmperas “H32” e “H34”	78
FIGURA 32	Curva de fadiga axial da liga AlMg 5083, têmpera H32, long.....	79
FIGURA 33	Curva de fadiga axial da liga AlMg 5083, têmpera H32, transv.....	80
FIGURA 34	Curva de fadiga axial da liga AlMg 5083, têmpera H34, long.....	81
FIGURA 35	Curva de fadiga axial da liga AlMg 5083, têmpera H34, transv.....	82
FIGURA 36	Curvas 0207: Efeitos dos elem. de liga na condição “H32”, Long...	86
FIGURA 37	Curvas 0308: Efeitos dos elem. de liga na condição “H32”, Transv	86
FIGURA 38	Curvas 0409: Efeitos dos elem. de liga na condição “H34”, Long...	87
FIGURA 39	Curvas 0510: Efeitos dos elem. de liga na condição “H34”, Transv	87
FIGURA 40	Curvas 02030405: Efeitos das têmperas e anisotropia na liga AlMg 5182.....	89
FIGURA 41	Curvas 07080910: Efeitos das têmperas e anisotropia na liga AlMg 5083.....	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Aplicações das ligas de alumínio da série 5XXX, fabricadas pela Alcan.....	30
TABELA 2	Composição química das ligas de alumínio-magnésio “Alcan”.....	31
TABELA 3	Propriedades mecânicas das ligas de alumínio-magnésio “Alcan”...	32
TABELA 4	Efeito do acabamento superficial na vida de um componente mecânico.....	39
TABELA 5	Identificação da liberação de fusão da liga AlMg 5083.....	47
TABELA 6	Identificação da liberação de fusão da liga AlMg 5182.....	47
TABELA 7	Composição da liga AlMg 5083, na fusão.....	48
TABELA 8	Composição da liga AlMg 5182, na fusão.....	49
TABELA 9	Composição química das ligas após o laminador Tandem.....	50
TABELA 10	Propriedades mecânicas das ligas AlMg 5083 e 5182 “Alcan”	51
TABELA 11	Dimensões dos corpos de prova referentes às regiões de ruptura (conf. Figura 21), e os resultados dos carregamentos.....	63
TABELA 12	Resultado dos ensaios de tração dos cdp’s na condição “O”.....	64
TABELA 13	Dimensões dos corpos de prova referentes às regiões de ruptura, têmperas “H32” e “H34” e os resultados dos carregamentos.....	68
TABELA 14	Resultado dos ensaios de tração dos cdp’s nas têmperas “H32” e “H34”	69
TABELA 15	Ensaio de dureza das ligas AlMg 5083 e 5182.....	72
TABELA 16	Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5182, longitudinal, H32.....	74
TABELA 17	Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5182, transversal, H32.....	75
TABELA 18	Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5182, longitudinal, H34.....	76
TABELA 19	Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5182, transversal, H34.....	77
TABELA 20	Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5083, longitudinal, H32.....	79
TABELA 21	Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5083, transversal, H32.....	80
TABELA 22	Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5083, longitudinal, H34.....	81
TABELA 23	Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5083, transversal, H34.....	82
TABELA 24	Combinação das curvas para comparação das duas ligas submetidas aos ensaios de fadiga axial.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAA	American Aluminum Association
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALCAN	Alcan Alumínio do Brasil Ltda. (unidade de Pindamonhangaba-SP).
cdp	Corpo de prova.
DEMAR	Departamento de Materiais da FAENQUIL.
DMT	Departamento de Materiais e Tecnologia (FEG/UNESP).
ED	Ensaios destrutivos
END	Ensaios não destrutivos.
FAENQUIL	Faculdade de Engenharia Química de Lorena.
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Metade do comprimento da trinca
AlMg	Liga de Alumínio-Magnésio
$\Delta\sigma$	Variação de tensão / Amplitude de tensão no ciclo
σ	Tensão aplicada
σ_a	Tensão alternada
σ_e	Tensão limite de escoamento
σ_m	Tensão média.
$\sigma_{\text{máx.}}$	Tensão máxima
$\sigma_{\text{min.}}$	Tensão mínima
σ_r	Tensão limite de ruptura
σ_u	Tensão limite de resistência
cm	Centímetro
F _{máx.}	Carga máxima
g	Aceleração da gravidade
h	Hora

HB	Dureza Brinell
Hz	Hertz
kgf	Quilograma força
m	Metro
mm	Milímetro
MPa.	Mega pascal
N	Número de ciclos
°C	Graus Celsius
r	Raio da curvatura na ponta da trinca
R	Razão de tensão
s	Segundo
t	Tempo

1 INTRODUÇÃO

Para se definir e aplicar materiais num dado projeto, para suportarem trabalhos de certa severidade, não é aceitável dimensioná-los simplesmente por suas propriedades mecânicas isoladamente, pois outros fatores importantes devem ser considerados para a sua exeqüibilidade, tais como: seu custo, sua qualidade e seu fornecimento.

A Alcan uma das maiores empresas do mundo atuante no negócio de alumínio, atenta a este conjunto de fatores, busca nesta pesquisa conhecer mais sobre as propriedades mecânicas de duas ligas de alumínio-magnésio de sua linha de produção, para compará-las entre si, no que tange a solicitações de fadiga axial, característica fundamental a ser conhecida para demonstrar para si e a seus clientes o quê e quanto uma difere da outra. O propósito é otimizar o processo produtivo passando de uma linha de produção intermitente para contínua. Assim em vez de processar dois materiais tecnicamente semelhantes, para aplicações diversas, a empresa passa a oferecer um só produto que atenderá a todos, obtendo com essa postura uma significativa redução nos custos de produção e também no tempo de atendimento aos pedidos de seus clientes. Portanto, os usuários (clientes) da liga descartada pelo fornecedor poderão ser contemplados com uma outra liga semelhante que atenda suas necessidades, porém com alguma diferenciação.

As características mecânicas em solicitações estáticas das duas ligas são de domínio do fabricante e do cliente. No entanto, o conhecimento do comportamento destas quando submetidas a solicitações dinâmicas fornecerá subsídios técnicos para a confirmação acertada da decisão tomada pelo fabricante e, por outro lado, o cliente se certificará das características do produto adquirido, principalmente no que diz respeito a resistência à fadiga axial.

1.1 OBJETIVO

Neste trabalho busca-se desenvolver uma metodologia para reproduzir o processo de fabricação das ligas de alumínio-magnésio 5083 e 5182 produzidas pela empresa Alcan, a partir de um estágio do processo de fabricação (laminador Tandem) e obter as duas ligas nas têmperas O, H32 e H34, contemplando os efeitos de anisotropia (sentido longitudinal e transversal de laminação).

A partir destas matérias-primas, confeccionar e ensaiar destrutivamente corpos de prova em tração estática e fadiga axial.

Após os ensaios compilar os dados e gerar curvas características de performance destes materiais quando submetidos a solicitações de fadiga axial e, compará-los entre si, para fornecer parâmetros destes comportamentos.

As análises dos resultados obtidos e ordenados informarão quais variáveis produzem maiores efeitos nestas ligas, como por exemplo:

- Os efeitos do magnésio nestas ligas em solicitações mecânicas estáticas são conhecidos, tais como: dureza e limite de resistência à tração (até 15% de Mg), que aumentam gradativamente com o aumento de sua porcentagem e o alongamento que tem comportamento oposto, decresce com o aumento de Mg. Nesta pesquisa fixou-se a porcentagem de magnésio das duas ligas e variaram-se os outros elementos de liga secundários. Assim, estes elementos serão os agentes diferenciadores nas análises dos comportamentos das duas ligas em fadiga axial.
- Os diversos tratamentos ou “têmperas” (O, H32 e H34) alteram as propriedades mecânicas estáticas segundo a sequência: H34>H32>O. Nesta pesquisa deverá ser determinada a influência destes tratamentos nas duas ligas quando submetidas à solicitação cíclica.
- A anisotropia é um fator importante no projeto de componentes mecânicos, onde o sentido de laminação é preferencial na direção de maior esforço. Assim os ensaios de fadiga elaborados neste trabalho, informarão se este comportamento se confirma, ou seja, se no sentido de laminação o componente quando solicitado em fadiga axial é mais resistente que no transversal.
- Uma análise conjunta das variáveis acima deverá ser feita para dar subsídios para o fornecedor e a seus clientes quando estes optarem por uma ou outra liga.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O ALUMÍNIO PRIMÁRIO

O Alumínio devido à abundância do seu principal minério (bauxita) e de suas propriedades vêm se tornando o metal mais importante, após o Ferro. O alumínio é um metal de cor branca característica, dúctil, maleável, baixa densidade. Funde-se a 660°C ; seu peso específico é de $2,7 \text{ g/cm}^3$ a 20°C e o módulo de elasticidade é de $62,1 \text{ GPa}$. (6.336 kgf/mm^2). Sua estrutura cristalina é cúbica de face centrada. Apresenta boa condutibilidade térmica e relativamente alta condutibilidade elétrica (62% da do cobre). É não-magnético e de baixo coeficiente de emissão térmica. Entretanto, a resistência mecânica é baixa no estado puro (99,99% Al), o seu valor está em torno de a 49 a 59 MPa e no estado encruado (laminado a frio com redução de 75%) sobe para cerca de 112,7 MPa. É muito dúctil: alongamento de 60 a 70%. Apresenta boa resistência à corrosão devido à estabilidade do seu principal óxido Al_2O_3 que se forma na superfície do metal. Essa resistência à corrosão é melhorada por anodização, que ainda melhora sua aparência, tornando-o adequado para aplicações decorativas. As ligas de alumínio não apresentam a mesma resistência à corrosão que o alumínio puro, de modo que quando se deseja aliar a maior resistência mecânica das ligas com boa resistência à corrosão do alumínio quimicamente puro, utiliza-se o processo de revestimento da liga por capas de alumínio puro (cladding), originando-se o material Alclad (BARILE; CHIAVERINI, 1981, 1986).

O alumínio praticamente é obtido a partir da bauxita e da criolita. A bauxita é constituída de uma mistura de vários minerais de origem secundária, como a gipsita, boehmita, diásporo e cliaquita, além de impurezas argilosas, óxidos de ferro, titânio, manganês e outros. A criolita é um fluoreto duplo de alumínio e sódio ($\text{AlF}_3 \cdot 3\text{NaF}$). Sob o aspecto técnico as bauxitas são as mais importantes.

O processo primário para obtenção de alumínio compõe-se das seguintes fases:

- Obtenção da alumina mais pura possível e
- Redução dessa alumina em alumínio metálico por eletrólise (BARILE, 1981).

Para a obtenção da alumina purificada é utilizado o processo Bayer, na maioria das vezes. Esse processo, sinteticamente, consiste no seguinte: A bauxita bruta em pedaços grandes é moída e aquecida a seguir em forno rotativo, não só para facilitar a desidratação e

posterior moagem fina, como também para destruir a matéria orgânica. A moagem fina é processada em moinho de bolas. A bauxita assim preparada é colocada em um misturador e passa por sucessivas operações de lixiviação. Obtém-se assim a alumina hidratada que, para poder ser empregada na eletrólise precisa ser libertada de água de hidratação, mediante a calcinação em fornos rotativos. Essa alumina desidratada vai à redução por via eletrolítica. Para isso, dissolve-se a alumina em um banho de sais fundidos, constituído essencialmente por criolita (fluoreto de Al e sódio). Essa dissolução se eletrolisa nos chamados fornos de eletrólise, onde a corrente elétrica mantém constantemente o banho em fusão, e o Al separado vai se reunindo no fundo da cuba do forno. Periodicamente se retira esse Al do fundo do forno que trabalha sem interrupção (BARILE, 1981).

O processo primário de obtenção do alumínio descrito acima demanda muita energia, tornando seu custo elevado. Uma referência do rendimento desta operação está representada na Figura 1. Diante deste quadro, as empresas deste segmento passaram a utilizar-se também do expediente da reciclagem, onde a energia necessária é da ordem de apenas 5% da utilizada pelo processo primário, ou seja, uma economia de 95% da energia total. A Figura 2 ilustra o ciclo completo do processo de reciclagem (ALCAN, Catálogo 2001).

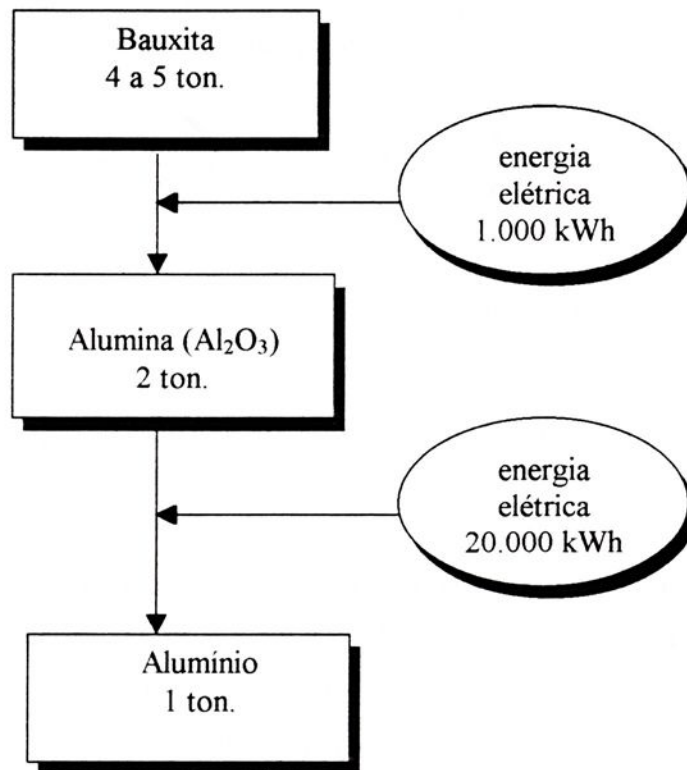


Figura 1 - Rendimento na obtenção do alumínio primário (BARILE, 1981).

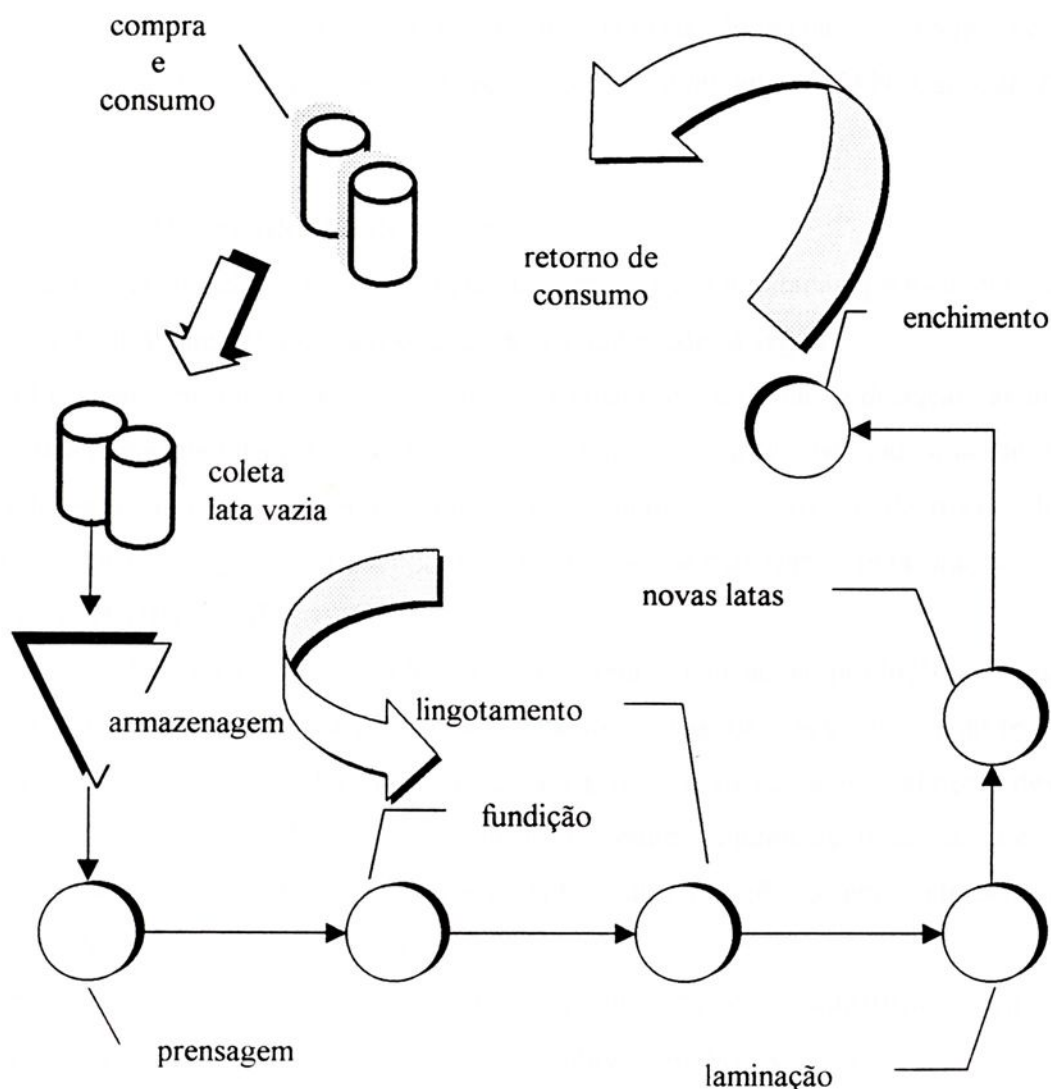


Figura 2 - Processo de reciclagem das latas de ligas de alumínio (ALCAN, Catálogo 2001).

O processo da reciclagem ilustrado na Figura 2, basicamente inicia-se na aquisição pelo consumidor do produto que vem embalado em latas de ligas de alumínio, que após o consumo do produto faz-se o descarte desta embalagem. Após esta etapa recicladores coletam e armazenam estas latas até uma quantidade mínima economicamente viável e repassam para as empresas intermediárias deste segmento de reciclagem, que prensam estas latas e as vendem para as indústrias que processam e fornecem o alumínio e suas ligas em produtos acabados, tais como: blocos, chapas, perfis etc. Este processo industrial específico para embalagens resume-se a: fundição do material prensado, desta matéria-prima fundida faz-se o

lingotamento, na sequência lamina-se os lingotes em chapas finas e conforma-se estas chapas em novas latas. Estas novas latas serão adquiridas pelos fabricantes de produtos finais, como bebidas, que as enchem e voltam a distribuir para os locais de venda, como supermercados e afins, fechando-se assim o ciclo básico da reciclagem de alumínio (ALCAN, Catálogo 2001).

2.2 O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

A aplicação do alumínio e suas ligas são praticamente ilimitadas, pode-se dizer que não há setor industrial que não os empregue, conforme indicações a seguir:

O primeiro em importância é o setor de transportes, no qual se destacam as indústrias aeronáuticas, automobilísticas, de material ferroviário e naval. Na indústria de veículos automotores, o alumínio tem substituído o ferro, tanto na construção de rodas, blocos de motores e partes complementares, como na fabricação de carroçarias para ônibus e veículos semelhantes (CHIAVERINI, 1986).

Na indústria ferroviária, é utilizado com predominância na produção de vagões de passageiros e, no setor naval, na construção de navios de passageiros de grande porte.

Na indústria elétrica e eletrônica, serve para produção de cabos e condutores destinados à transmissão de energia. Nesse ramo, substitui predominantemente o cobre, que, embora ofereça maior condutibilidade, melhor ductilidade, maior resistência, em contrapartida é três vezes mais denso, além do custo maior (BARILE, 1981).

As indústrias de embalagens, utensílios domésticos e construção civil também empregam o alumínio como substituto do ferro, cobre, chumbo e estanho.

O alumínio e suas ligas, desde a época de sua descoberta, tem tido usos e aplicações crescentes. Uma grande variedade de ligas comerciais de alumínio, e de tratamentos térmicos fornecem combinações específicas de resistência mecânica, tenacidade à fratura, resistência à fadiga, resistência à corrosão, soldabilidade e formabilidade.

As ligas de alumínio são ideais para aplicações estruturais em larga faixa de temperatura e taxas de carregamento, considerando os seguintes fatores:

- Elevadas relações resistência/densidade;
- Como em outros materiais cúbicos de faces centradas, não exibem a transição brusca dúctil-frágil no comportamento em fratura, com o abaixamento da temperatura;

- Resultados experimentais obtidos em ensaios de tração indicam que em baixas temperaturas e na temperatura ambiente, praticamente todas as ligas de alumínio são insensíveis a taxas de deformação entre 10^{-5} mm/mm/s e 1,0 mm/mm/s.

Pode-se subdividir o estudo do alumínio e suas ligas em dois grupos:

Alumínio puro

Ligas de Alumínio

Com o oxigênio, o alumínio puro forma na superfície um óxido protetor contra a corrosão em certos meios agressivos. Este óxido denominado alumina (Al_2O_3), é aderente, inerte, transparente e contínuo. Quanto mais puro for o alumínio, maior a sua resistência à corrosão; por outro lado, à baixa resistência mecânica e o custo de obtenção do alumínio puro limitam seu campo de aplicação.

Nas ligas de alumínio de maior uso industrial, os principais elementos de liga são: o cobre, o silício, o zinco e o magnésio. Das combinações destes elementos com o alumínio podem-se obter ligas de baixa massa específica, de alta resistência a tração e a compressão. O que permitem aplicações em quase todas as áreas tecnológicas.

Uma das formas de se classificar as ligas de alumínio é a divisão em dois grandes grupos, conforme o tipo de processo de fabricação do produto:

Ligas trabalhadas

Ligas fundidas

As ligas para trabalho mecânico e para fundição podem ainda ser subdivididas em ligas que podem ou não ser endurecidas por envelhecimento. As ligas trabalhadas podem ainda ser subdivididas conforme o mecanismo de endurecimento:

Ligas endurecidas por trabalho mecânico (work hardening), e

Ligas endurecidas por elementos de ligas (alloy hardening).

O endurecimento por trabalho mecânico é obtido através de algum processo de conformação a frio e está relacionado à dificuldade em se promover o movimento de discordâncias durante a deformação plástica a partir de sua multiplicação e empilhamentos em contornos de grãos no interior do metal.

Por outro lado, o endurecimento por combinações com elementos de liga está baseado na interação entre discordâncias e átomos estranhos à rede de alumínio.

Para identificação de ligas de alumínio e têmperas a empresa Alcan utiliza-se das normas “ABNT” (NBR 6834 e NBR 6835), que são compatíveis com as normas da “AAA”.

A “AAA” propõe quatro dígitos para a identificação das ligas de alumínio trabalháveis, conforme descrito abaixo:

O primeiro dígito indica o grupo de liga, como segue:

- 1XXX - (Alumínio não ligado de no mínimo 99,00% de pureza);
- 2XXX - (elemento de liga principal: cobre);
- 3XXX - (elemento de liga principal: manganês);
- 4XXX - (elemento de liga principal: silício);
- 5XXX - (elemento de liga principal: magnésio);
- 6XXX - (elemento de liga principal: magnésio-silício);
- 7XXX - (elemento de liga principal: zinco);
- 8XXX - (outros elementos) e
- 9XXX - (série não-utilizada).

O segundo dígito indica modificações na liga original ou dos limites de impurezas. Os dois últimos dígitos identificam a liga de alumínio (Grupos 2XXX até 8XXX), ou indicam a pureza do alumínio (Grupo 1XXX).

As ligas dos grupos 1XXX, 3XXX, 4XXX, e 5XXX, somente são endurecíveis por trabalho mecânico. Para as ligas 5XXX (AlMg) com até 2% de Mg não se pode solubilizar, nem envelhecer. Porém, acontece que estas ligas com 2 a 8% de Mg, embora possam, não devem ser tratadas termicamente, pois o ganho nas propriedades mecânicas é tão pequeno que não são levados em consideração, por esse motivo são classificadas como não tratáveis até 8% de magnésio.

No caso da empresa Alcan sua linha de ligas alumínio-magnésio atinge até no máximo 5% de magnésio, portanto não tratáveis termicamente (BARILE, 1981).

Os tratamentos são designados da seguinte forma:

- F – Como Fabricado: Não existe controle sobre o grau de endurecimento;
- O – Recozida: Condição que fornece menor resistência e maior ductilidade;

H – Hard: Indica que a liga foi endurecida por deformação a frio;

W - Solubilizado e

T – Tratado termicamente.

Subdivisões da têmpera H:

O primeiro dígito que segue o H indica as operações específicas básicas, como segue:

H1 – Endurecida por deformação sem tratamento posterior;

H2 – Endurecida por deformação e parcialmente recozida; e

H3 – Endurecida por deformação e estabilizada.

Um segundo dígito Y que segue esta designação: H1Y, H2Y e H3Y em ordem crescente e dividido por oito, indica o grau de endurecimento por deformação.

Exemplos:

H11 = grau 1 : 1/8 duro (~15% no grau de redução na deformação plástica);

H12 = grau 2 : 1/4 duro (~20%);

H14 = grau 4 : 1/2 duro (~35%);

H16 = grau 6 : 3/4 duro (~60%);

H18 – totalmente endurecido (~75%) e

H19 – condição extra-endurecida (~85%).

A condição H3 é empregada para as ligas Al-Mg do grupo 5XXX, que se caracterizam por um amolecimento com o tempo pós-endurecimento por deformação.

O ganho na ductilidade e a estabilização das propriedades da liga ocorrem com o aquecimento a uma temperatura próxima de 120 °C, por um período curto de tempo.

Um terceiro dígito pode ser empregado nas condições H1, H2 e H3, para indicar um nível de propriedade intermediária entre dois estágios de deformação a frio. Assim, H321 significa uma liga endurecida durante o processo de fabricação, com controle do grau de endurecimento.

Considerando a possibilidade de diversas combinações entre tempo e temperatura, no tratamento térmico de envelhecimento e também o tipo de deformação, para que um determinado nível de propriedades mecânicas seja atingido, mais de um método de

identificação das ligas de alumínio se fez necessário, e a “AAA” estabelece a padronização seguinte:

Designações básicas

F - como fabricado: aplicado a produtos onde não é exigido nenhum controle especial sobre o tratamento térmico ou o endurecimento por deformação. No caso de produtos trabalhados, não há limite para propriedades mecânicas.

O - recozido: é utilizado para a obtenção de menores valores de resistência mecânica em componentes trabalhados e em produtos fundidos para melhorar a ductilidade e a estabilidade dimensional.

W - solubilizado: aplicável somente a produtos que envelhecem naturalmente na temperatura ambiente após a solubilização. Esta representação é específica quando o tempo de envelhecimento natural é indicado.

T - tratado termicamente: quando da obtenção de uma estrutura estável em produtos termicamente tratados, com ou sem endurecimento por deformação completa.

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A IMPORTÂNCIA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO NA INDÚSTRIA

A grande variedade de ligas comerciais de alumínio, e de tratamentos térmicos permitem combinações específicas de resistência mecânica, tenacidade à fratura, resistência à fadiga, resistência à corrosão, soldabilidade e conformabilidade. Estas características aliadas a elevadas relações de resistência/massa específica, fazem com que as ligas de alumínio sejam uma das melhores especificações para diversas aplicações na engenharia e principalmente na indústria aeronáutica, onde as ligas quaternárias Al-Zn-Mg-Cu da série 7XXX foram desenvolvidas em grande escala para aplicações estruturais (TURNBULL; SANCTIS; BRYANT, 1995, 1992, 1976).



A indústria aeroespacial exige um controle muito rigoroso na seleção de materiais que serão utilizados na fabricação de aeronaves. Uma vez conhecidas as solicitações em serviço e as fases presentes na missão, o projeto deve levar em consideração partes distintas da aeronave, pois diferentes critérios para seleção de materiais serão empregados para diferentes partes desta. O desempenho das propriedades pode ser efetivo somente em parte da estrutura; ou seja, o aumento da resistência estática é útil somente em regiões de elevada intensidade de carregamento, como por exemplo, na asa, enquanto que em regiões de carregamento moderado, a rigidez é o principal critério de projeto, e em regiões levemente carregadas a consideração importante é a perda de espessura por corrosão superficial, e no aspecto geral a massa específica do material é importante na aeronave como um todo (STARKE, 1996).

2.4 O ESTADO DA ARTE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO MAGNÉSIO, AlMg 5083 E AlMg 5182

As ligas do grupo 5XXX são as de alumínio-magnésio, nas quais o magnésio é o principal elemento da liga. São dúcteis no estado recozido, mas endurecem rapidamente sobre o trabalho a frio, possuem excelente soldabilidade e alta resistência à corrosão em ambientes marítimos. Em geral, a resistência mecânica aumenta com os teores crescentes de magnésio. O diagrama de equilíbrio que rege tais ligas está representado na Figura 3, e indica que a adição de magnésio no alumínio faz baixar sensivelmente a temperatura de início de fusão da ligas formadas (BARILE, 1981).

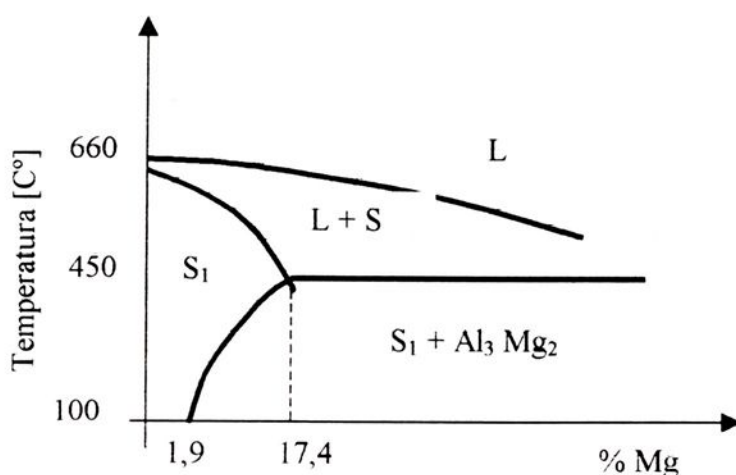


Figura 3 - Diagrama de equilíbrio das ligas de alumínio-magnésio (BARILE, 1981).

Combinações especiais de ligas de alumínio-magnésio da série 5XXX, para atender características especiais de trabalho estão referenciadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Aplicações das ligas de alumínio da série 5XXX, fabricadas pela Alcan (ALCAN, Catálogo 2001).

Liga AlMg	Aplicações
5052	Persianas, barcos, placas de sinalização, carrocerias de ônibus e furgões, além do uso geral de estamparia.
5082	Anéis para aberturas de latas de bebidas e de alimentos.
5083	Embarcações, vagões ferroviários, tanques e reservatórios industriais, estruturas soldadas, vasos criogênicos, veículos militares, silos e tanques rodoviários.
5086	Embarcações, botijões de gás, tanques rodoviários e silos.
5182	Tampas para latas de bebidas, carrocerias de automóveis/caminhões e componentes para bicicletas.
5454	Tanques para indústria química e estruturas soldadas.

Tabela 2 - Composição química das ligas de alumínio-magnésio “Alcan”, série 5XXX (ALCAN, Catálogo 2001).

Liga Alcan		5052	5082	5083	5086	5182	5454	
Elemento - % Em Peso (1)	Silício	0,25	0,20	0,40	0,40	0,20	0,25	
	Ferro	0,40	0,35	0,40	0,50	0,35	0,40	
	Cobre	0,10	0,15	0,10	0,10	0,15	0,10	
	Manganês	0,10	0,15	0,40 - 1,00	0,20 - 0,70	0,20 - 0,50	0,50 - 1,00	
	Magnésio	2,20 - 2,80	4,00 - 5,00	4,00 - 4,90	3,50 - 4,50	4,00 - 5,00	2,40 - 3,00	
	Cromo	0,15 - 0,35	0,15	0,05 - 0,25	0,05 - 0,25	0,10	0,05 - 0,20	
	Zinco	0,10	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
	Titânio	-	0,10	0,15	0,15	0,10	0,20	
	Outros	cada	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
		total	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Alumínio		(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	

Observações: (1) Faixas não mencionadas, a porcentagem indicada é a máxima.

(2) A porcentagem de alumínio é a diferença entre 100% e a somatória dos demais elementos metálicos com porcentagem superior a 0,010%, expressa até a segunda casa decimal.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das ligas de alumínio-magnésio "Alcan" (ALCAN, Catálogo 2001).

Liga	Têmpera	Limite de resistência à tração [MPa]		Limite de escoamento [MPa]	Alongamento mínimo em porcentagem (50 mm) (1,6 mm de espessura)	Dureza Brinell [HB]
		mínimo	máximo	mínimo		
5052	O	170	215	65	19	47
	H32	215	265	160	7	60
	H34	235	285	180	6	67
	H36	255	305	200	4	74
	H38	270	-	220	4	80
5082	H19	353	-	329	4	-
5083	O	275	350	125	16	68
	H32	310	370	235	10	78
	H34	345	405	270	8	90
5086	O	240	305	95	18	-
	H32	275	325	195	8	73
	H34	300	350	235	6	82
	H36	325	375	260	6	-
	H38	345	-	285	3	-
5182	O	275	-	130	21	70
	H19	363	-	285	4	-
5454	O	215	285	85	16	62
	H32	250	305	180	8	73
	H34	270	325	200	6	81

2.5 FADIGA

A fadiga é essencialmente um fenômeno onde componentes submetidos a carregamentos cíclicos, por um certo período de tempo, têm suas aplicações comprometidas através de um processo gradual de dano cumulativo; ou seja, nucleação e propagação de microtrincas em tensões inferiores ao limite de escoamento do material. Deste modo, fraturas por fadiga em estruturas são causadas pelo início e crescimento de trincas nos materiais.

Estima-se que os fenômenos de fadiga sejam responsáveis por noventa por cento das falhas mecânicas em serviço (MEYERS, 1982). Ocorrem geralmente a partir de um ponto de concentração de tensão (canto vivo ou entalhe) ou em inclusões.

Os conhecimentos sobre o mecanismo de fadiga permitem dividi-los nos seguintes estágios [FINE, 1980]:

1º Estágio - microdeformação plástica sob solicitações cíclicas, com formação de bandas de escorregamento;

2º Estágio - nucleação de uma ou mais microtrincas;

3º Estágio - propagação de uma ou mais macrotrincas e

4º Estágio - propagação instável da trinca até a fratura final.

Nos monocristais, a fase inicial da nucleação da trinca pode levar um tempo considerável. Já nos metais policristalinos, assume-se que a fase preliminar da propagação da trinca não existe, porque a superfície de um componente de engenharia envolve aproximadamente 10^6 grãos/cm² e uma variedade de concentradores de tensões superficiais como: contornos de grãos, pontos triplos, marcas de usinagem, inclusões e entalhes que, separadamente ou associados entre si, podem ser o ponto de partida de uma trinca. Estas trincas propagar-se-ão até serem interrompidas por uma barreira microestrutural ou uma redução do campo de tensão-deformação, ou ambas (MILLER, 1993).

Para que haja propagação de uma trinca é necessário que a tensão na ponta desta seja maior do que a força de coesão do material. A Figura 4 ilustra uma trinca elíptica fina numa

placa infinitamente larga. Admite-se que a tensão coesiva teórica máxima aproximada $\sigma_{m\acute{a}x.}$ pode ser atingida localmente na ponta da trinca, enquanto a tensão média σ_m é muito mais baixa (DIETER, 1981).

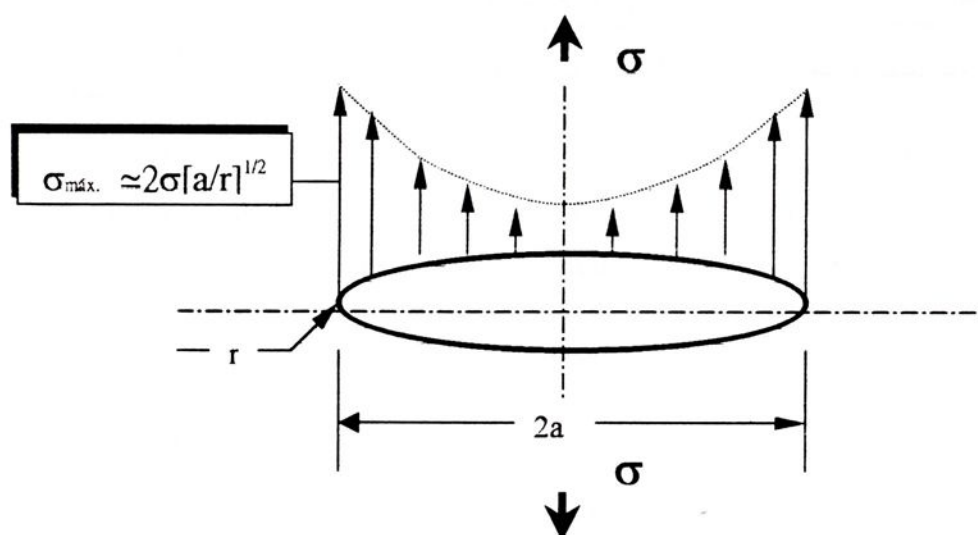


Figura 4 - Representação da distribuição de tensões numa trinca (DIETER, 1981).

2.5.1 Características estruturais da fadiga.

Em um processo de falha por fadiga em metais, inicialmente formam-se microtrincas que coalescem, crescem até tornarem-se macrotrincas e que se propagam até à fratura do componente (VOORWALD, 1995). O início de trincas por fadiga está relacionado à formação de intrusões e extrusões em uma superfície. Cottrell e Hull propuseram um mecanismo para a formação destas extrusões e intrusões originadas pela interação entre deslocamentos de bandas de deslizamento (DIETER, 1981).

W. A. Wood sugeriu outro mecanismo para a formação de extrusões e intrusões, resultantes de um acúmulo sistemático de pequenos movimentos de deslizamento da ordem de 10^{-7} cm. A Figura 5 ilustra o conceito de Wood (DIETER, 1981).

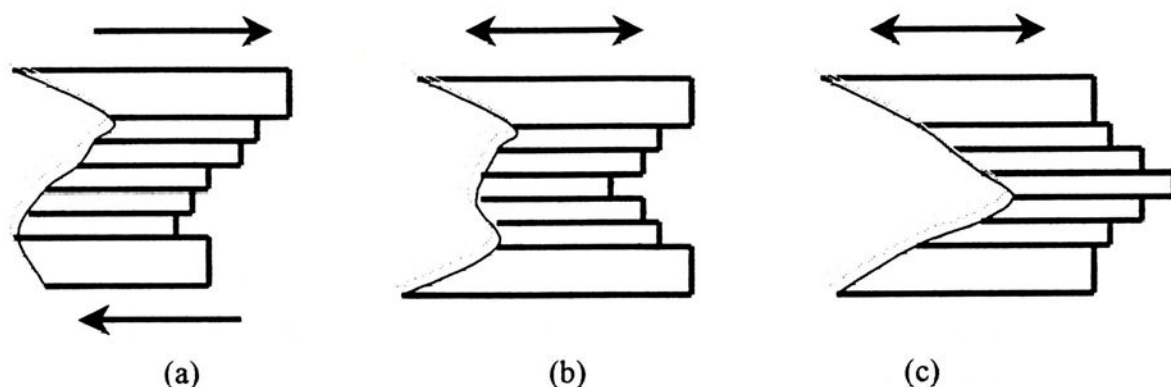


Figura 5 - Conceito de Wood: (a) deformação estática; (b) deformação de fadiga originando intrusão; (c) deformação de fadiga originando extrusão (DIETER, 1981).

2.5.2 Curvas σ -N.

O método de caracterização das propriedades em fadiga a partir de dados experimentais ocorre através das curvas de Wöhler ou curvas σ -N. Neste caso, a variação do número de ciclos é representada em curvas até a fratura do componente em função da variação da tensão aplicada.

A tensão na qual não ocorre fratura do corpo de prova (cdp), é considerada como o limite de resistência à fadiga do material, geralmente da ordem de 10^7 ciclos. Para materiais metálicos que não apresentam o limite de fadiga, como no caso das ligas de alumínio, o ensaio é interrompido em um nível de tensão onde a vida em fadiga seja da ordem de 10^8 ciclos (VOORWALD; MILLER, 1995, 1993).

Uma referência importante é a classificação dos ciclos. A fadiga é de alto ciclo quando o número de ciclos até a fratura ultrapassa uma faixa de 10^4 a 10^5 ciclos, com tensão nominal atuante geralmente elástica. A fadiga de baixo ciclo ocorre para tensão e deformação predominantemente plásticas, com fratura ocorrendo em menos de 10^4 a 10^5 ciclos. Como pode ser observado, as tensões máximas na fadiga de baixo ciclo são geralmente maiores, o que aumenta a importância dos efeitos não-lineares. (VOORWALD, 1995).

A Figura 6, ilustra o comportamento das curvas de fadiga para materiais metálicos ferrosos e não-ferrosos (MEYERS, 1982).

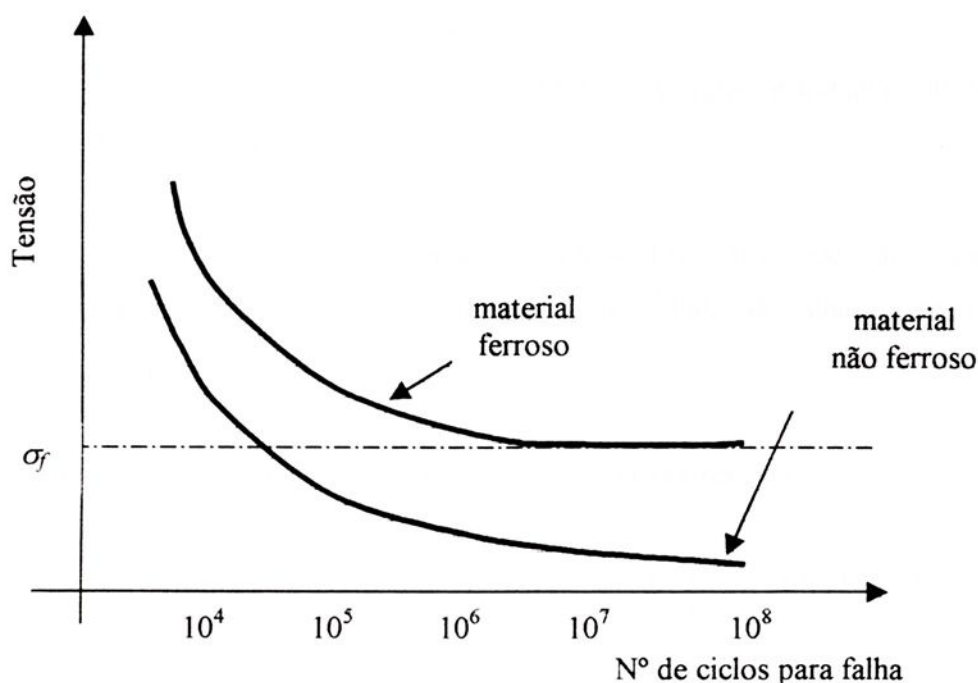


Figura 6 - Curvas de fadiga para metais ferrosos e não ferrosos (MEYERS, 1982).

Nos resultados obtidos dos ensaios de fadiga normalmente ocorrem espalhamentos nos valores (dispersões), que podem ser interpretados pelo ajuste dos dados através de uma função de distribuição estatística (SCHIJVE, 1993). As duas funções mais frequentes na literatura clássica para a vida em fadiga são:

Função de distribuição Normal (Gauss) e

Função de parâmetro de distribuição de Weibull.

A função de distribuição normal ou Gaussiana descreve a distribuição da vida em fadiga através de um intervalo de probabilidade de fratura na ordem de 10% a 90%.

A função de distribuição de Weibull é a distribuição de valor extremo e a mais utilizada para caracterizar o espalhamento dos dados de fadiga dos materiais metálicos. Esta distribuição de frequência de valores extremos assume que a falha por fadiga se iniciará no elo mais fraco da vida em fadiga de um lote de amostras.

2.5.3 Ciclos de tensões.

Basicamente os ciclos de tensões são classificados em:

- alternados, de forma senoidal: as tensões máximas e mínimas são iguais, porém de sinais opostos;
- flutuantes: tensões máximas e mínimas diferentes, podendo ser ambas de tração, ou ambas de compressão, ou ainda de sinais opostos (tração e compressão);
- aleatórias: sujeitas a sobrecargas periódicas imprevisíveis.

A figura 7 ilustra os ciclos de tensões descritos (MILLER; DIETER, 1993, 1981).

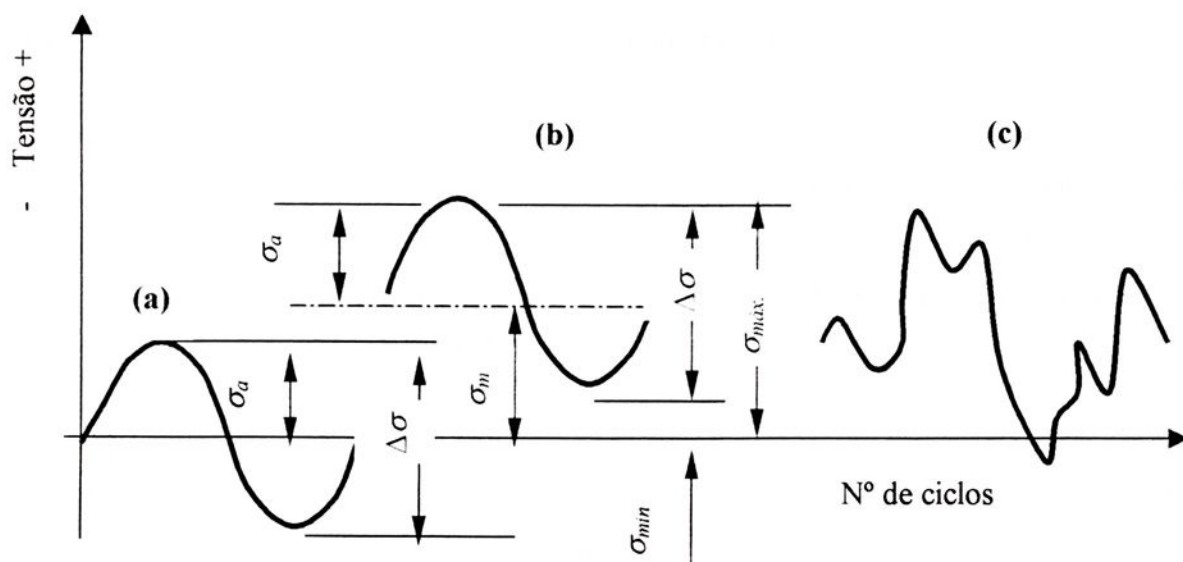


Figura 7 - Ciclos das tensões de fadiga: (a) tensão alternada; (b) tensão flutuante; e (c) tensão aleatória (MILLER; DIETER, 1993, 1981).

Os parâmetros que caracterizam os ciclos de tensões em fadiga são:

$\sigma_{\text{máx.}}$ => Tensão máxima

$\sigma_{\text{mín.}}$ => Tensão mínima

$\Delta\sigma$ => Variação de tensão

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}$$

σ_a => Tensão alternada

$$\sigma_a = \Delta\sigma / 2$$

σ_m => Tensão média

$$\sigma_m = (\sigma_{\text{máx.}} + \sigma_{\text{mín.}}) / 2$$

R => Razão de tensão

$$R = \sigma_{\text{mín.}} / \sigma_{\text{máx.}}$$

2.5.4 Fatores que influenciam no comportamento em fadiga.

Os mecanismos das falhas por fadiga são causados pela ação simultânea de tensões cíclicas, tensões de tração e deformações plásticas. Se qualquer um desses três fatores não estiver presente, a trinca de fadiga não se iniciará ou propagará. As tensões cíclicas e as deformações plásticas são os fatores que iniciam as trincas; e as tensões de tração propagam-nas (American Society for Metals - ASM, Atlas of Fatigue Curve, 1986).

São vários os fatores que aceleram falhas por fadiga, tais como: acabamento superficial, concentradores de tensão, tensões residuais trativas, estrutura metalúrgica, processos de fabricação, tratamentos superficiais, temperatura e ação do meio ambiente (VOORWALD, PhD Thesis).

- Acabamento superficial

O processo de fratura por fadiga, geralmente, origina-se na superfície de um componente em função desta região possuir as máximas tensões (DIETER,

1981). Exceto em casos especiais onde defeitos internos ou endurecimento superficial estão envolvidos.

O processo de fabricação, além de afetar a rugosidade nas regiões externas, pode introduzir tensões residuais compressivas na superfície, aumentando a resistência à fadiga do componente.

Fatores que afetam a superfície, com reflexos na resistência à fadiga, podem ser divididos em três categorias: rugosidade superficial ou concentradores de tensão na superfície; alterações nas propriedades superficiais do metal e alterações nas tensões residuais superficiais (ASM, 1986).

Uma correlação entre acabamento, rugosidade e vida do componente pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4 - Efeito do acabamento superficial na vida de um componente mecânico (DIETER, 1981).

ACABAMENTO SUPERFICIAL	RUGOSIDADE [μm]	VIDA RELATIVA EM ORDEM CRESCENTE
Tornado	2,67	1
Polimento parcial	0,15	2
Polido manualmente	0,13	3
Retificado	0,18	4
Retificado e polido	0,18	5
Super acabado	0,05	6

- Concentradores de tensão

A existência de concentradores de tensão em um componente, como: entalhes, rasgos de chavetas, filetes de roscas, furos, etc., diminuem drasticamente sua resistência à fadiga (DIETER, 1981). O escoamento plástico começa na ponta do entalhe, quando a tensão local atinge a tensão de escoamento do material.

O maior efeito de um entalhe não é a introdução de um concentrador de tensão, mas a produção de um estado triaxial de tensões trativas, por um alto encruamento localizado e de fissuração, e por um aumento localizado na taxa de deformação.

A presença de entalhes em chapas espessas é muito mais prejudicial do que em chapas finas, pois, promove o estado plano de deformação (DIETER, 1981). A Figura 8 referencia o comportamento em fadiga de corpos de prova com variados tipos de concentradores de tensão.

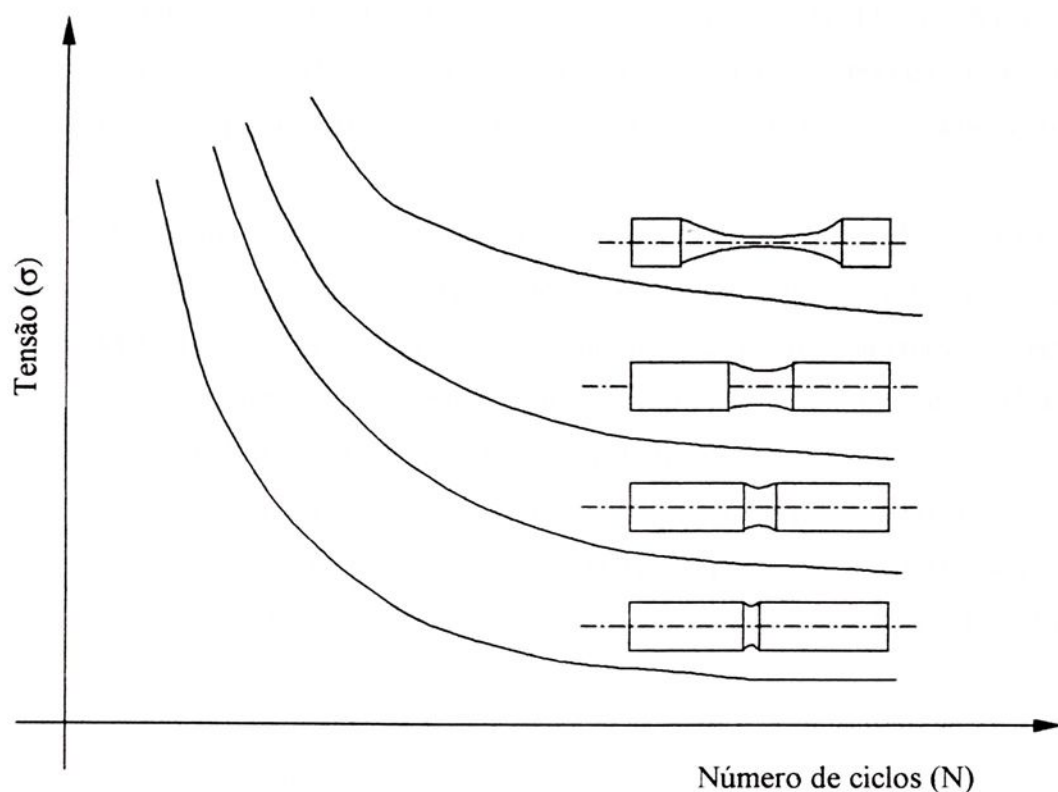


Figura 8 - Efeito de vários tipos de concentradores de tensão na vida em fadiga nos corpos de prova submetidos a ensaios destrutivos (MILLER, 1993).

- Tensões residuais

Em meados da década de 1970, Reed e Viens descobriram uma relação entre as tensões residuais da superfície do titânio e seu limite de fadiga. Foi

constatado que tensões residuais de tração reduzem a resistência à fadiga e tensões residuais de compressão aumentam-na (MATSUMOTO, 1991). Atualmente, já é bem conhecido que as tensões residuais têm um papel importante na iniciação e crescimento de trincas por fadiga. As tensões residuais podem afetar em muito a vida ou a geometria de uma trinca de fadiga (OKAMOTO, 1990), e o estado de tensão local, próximo à superfície, é um fator importante para nuclear pequenas trincas de fadiga (TORIBIO, 1997).

Um dos processos utilizados para inserir tensões residuais compressivas em componentes mecânicos é o Shot peening, que é uma forma de trabalho a frio, em que a superfície de uma peça é bombardeada por pequenas esferas chamadas shot. O impacto dessas esferas na superfície da peça produz pequenas endentações ou “dimples”, por escoamento das fibras superficiais em tração. Essas fibras superficiais tentam restaurar a superfície a sua forma original, produzindo abaixo dos “dimples”, uma região encruada, altamente comprimida

A máxima tensão residual compressiva produzida na ou sob a superfície de uma peça, por shot peening, pode ser tão alta quanto 50% de sua tensão de escoamento. Este processo também produz, em muitos materiais, aumento na dureza superficial, devido ao efeito de encruamento (METAL IMPROVEMENT COMPANY; BLASTIBRÁS).

Em relação à fadiga, é possível melhorar a resistência de um componente pela aplicação do tratamento de shot peening, cuja tensão residual compressiva retarda ou elimina a iniciação e propagação de trincas (VASCONCELOS, 1992).

- Estrutura metalúrgica

As propriedades de fadiga dos metais depende muito de determinadas propriedades metalúrgicas como, por exemplo: tamanho do grão, microestrutura cristalina, inclusões, vazios, introdução de elementos de liga e outros.

Para se ter uma idéia da influência das variáveis citadas, a redução do tamanho do grão aumenta a resistência à fadiga, bem como os contornos de grãos que funcionam como bons obstáculos para a propagação de trincas. Por outro lado, a presença de inclusões reduz o limite de resistência à fadiga.



- Dimensões de componentes

Estudos têm demonstrado que a maioria dos casos existe influência das dimensões dos corpos de prova em ensaios destrutivos de resistência à fadiga, ou seja, a resistência à fadiga de amostras maiores é inferior à de amostras menores, em função da primeira apresentar maior superfície e, conseqüentemente, maior número de concentradores de tensão (DIETER, 1981).

- Temperatura

O aumento da temperatura tende a baixar o limite de fadiga dos materiais metálicos e a piorar a resistência à fadiga em geral. Tensões que surgem devido ao aparecimento da dilatação térmica em temperaturas elevadas, levam o material a fadiga térmica. Em geral estas tensões aparecem devido as restrições a livre deformação, durante as dilatações provocadas pelo calor.

- Efeitos ambientais

A resistência à fadiga de um metal é reduzida devido à iniciação e crescimento de trincas sob a ação combinada de carregamento cíclico e um meio agressivo. Este fenômeno é denominado fadiga de corrosão e seu sinergismo pode ter conseqüências muito maiores sobre a integridade de um componente do que cada fator agindo isoladamente ou por superposição (ASM, 1986).

2.6 CRITÉRIOS DE PROJETO PARA SOLICITAÇÕES EM CARREGAMENTOS CÍCLICOS

Os fenômenos da não-conformidade de componentes ou conjuntos mecânicos devido à falhas em serviço podem ter várias formas: ruptura parcial ou total, desgaste, deformação, perda da estabilidade etc. e resultam da ação isolada ou combinada de carregamentos (estático ou dinâmico), temperatura e o meio.

De uma forma geral pode-se dizer que a maioria das utilizações trabalha sob solicitações de comportamento cíclico, ou seja, dinâmica, o que levam os materiais a falharem sob tensões abaixo dos seus limites de escoamento, que é o fenômeno denominado fadiga.



Quando se tratar de fadiga, uma consideração fundamental para a escolha de um conjunto de propriedades importantes que os materiais devem possuir para se evitar a fratura catastrófica da estrutura é a criação de uma estratégia básica de projetos nas quais as ligas selecionadas serão aplicadas.

Um dos critérios de projeto é a filosofia de duração garantida ou de vida segura (“safe life”). Esta filosofia baseia-se na hipótese de que o material empregado não contenha trincas; ou pelo menos, que está sujeito a tensões aplicadas suficientemente baixas para não provocar propagação de trincas se estas existirem. Nesta filosofia, componentes que foram solicitados durante os seus tempos de vida segura projetados, deverão ser substituídos por outros novos (produto conforme) com a prática de manutenção preventiva. Porém, em muitos casos, a vida em trabalho destes componentes poderia ser prolongada sem que as falhas ocorressem, pois os cálculos são probabilísticos; assim se estes componentes forem monitorados após terem completados seus tempos de vida segura (desde que economicamente tal procedimento se justifique) haverá um ganho de vida e conseqüentemente um ganho nos custos operacionais, que nada mais é do que um procedimento de manutenção preditiva.

O outro critério é a filosofia de falha segura (“fail-safe”) ou tolerância ao dano (“damage tolerance”). Este considera que a proteção total contra trincas é essencialmente o estudo de propagação de trincas por fadiga e utiliza os conceitos da mecânica da fratura. Este método baseia-se na hipótese de que a estrutura tem alguma não conformidade (defeito), mas que continuará a trabalhar satisfatoriamente mesmo com a presença do mesmo. O projeto deve garantir que a propagação das trincas não conduzirá à completa falha estrutural, quer por escoamento geral ou por fratura frágil. Podemos dizer que o procedimento é de manutenção totalmente preditiva, pois o controle é feito através de inspeção periódicas com a finalidade de detectar trincas em sua dimensão mínima, de maneira que se possa monitorar as mesmas, antes que estas se propaguem completamente ao longo da vida útil do componente estrutural (GORANSON; PEREIRA; BARTER, 1997, 1996, 1993).

3 MATERIAIS E MÉTODOS.

3.1 PROCESSO BÁSICO PARA OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Um processo básico para a obtenção do alumínio e suas ligas está ilustrado na Figura 9, e em linhas gerais tem a seguinte sequência:

1) Matéria-prima

A produção recebe alumínio líquido ou alumínio primário oriundos dos processos primário, ou reciclado conforme Figuras 1 e 2, e armazena-os em local apropriado para alimentar os fornos de fusão. Em seguida inicia-se a refusão.

2) Refusão e preparação de placas.

Nesta fase o forno de fusão (FF) recebe as matérias-primas oriundas do recebimento e também dos descartes das operações subseqüentes e processa-se a fusão, em seguida o material fundido é transferido para o forno de tratamento (FT) onde faz-se a preparação da liga desejada através de procedimentos que asseguram a qualidade do produto final, por exemplo as ligas em estudo: 5083 e 5182. Deste ponto, com a liga ainda em fusão processa-se o lingotamento, através da máquina de lingotamento (ML). Na sequência faz-se a preparação das placas, que consiste em faceamento e reaquecimento através dos fornos de pré-aquecimento: forno poço (FP) e forno pusher (FP). Ao longo do processo colocam-se pontos estratégicos para inspeções de qualidade, onde produtos não-conformes voltam para a fase de refusão e somente os conformes seguem para a laminação a quente.

3) Laminação a quente

A placa proveniente da refusão é preparada, aquecida e, então, segue laminando a quente. O produto final desse processo é uma bobina ou

lâmina que poderá ser laminada a frio ou ser comercializada dessa forma.

No caso específico desta pesquisa utilizaram-se exclusivamente as matérias-primas a partir deste ponto (laminador Tandem), com o seguinte processo: para as duas ligas o processo procederam-se no aquecimento do ciclo a uma temperatura de 520 ± 15 °C, para processar a laminação em 25 passes, iniciando-se numa espessura das placas de 566 mm e terminando em 25,4 mm - a sequência das reduções em mm foi: 566, 550, 533, 515, 497, 478, 458, 438, 417, 399, 372, 349, 325, 300, 274, 247, 219, 190, 160, 130, 100, 80, 58, 40 e 25,4.

Equipamentos da laminação a quente: LD - laminador desbastador e LT - laminador Tandem.

4) Laminação a frio

A bobina laminada a quente é submetida, então, ao processo de laminação a frio, onde atinge a espessura e têmpera especificadas. Neste estágio acontecem combinações de laminações a frio (LF1 e LF2), fornos para têmperas (FR), manuseio e resfriamento (MR).

5) Acabamento

A bobina laminada a frio permite vários tipos de acabamento: pode ser planificada, cortada em formatos retangulares ou refilada em larguras menores. Também pode ser recozida em fornos com atmosfera controlada ou, até mesmo, desengraxada e revestida com óleos protetores (ALCAN CATÁLOGO; BARILE, 2001, 1981).



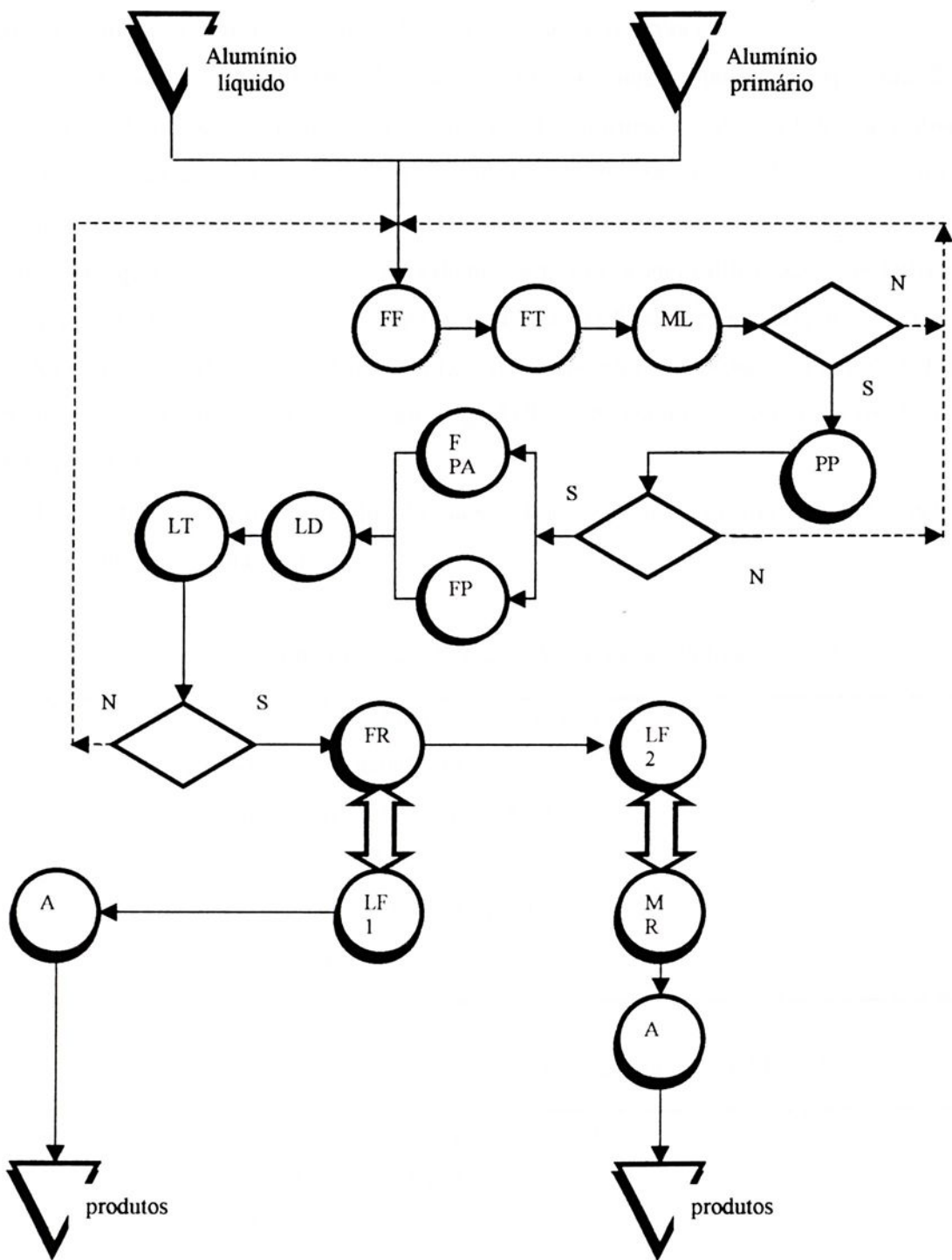


Figura 9 - Ciclo básico da laminação do alumínio e das suas ligas,
(ALCAN CATÁLOGO, 2001).

3.2 MATERIAIS.

Os materiais em estudo são duas ligas de alumínio-magnésio a 5083 e a 5182. Como o objetivo é compará-las entre si, a liga 5083 será a base de referência.

Estes materiais foram fornecidos pela Alcan em quatro placas de espessura 26 mm, largura de 500 mm e comprimento de 200 mm (comprimento, no sentido da laminação), sendo duas placas de cada liga, conforme Figura 12. Por razões de dimensões (espessura) estes materiais foram retirados no meio do processo, ou seja, após o laminador Tandem (LT) ilustrado na Figura 9. Devido a este expediente, a pesquisa além dos ensaios de fadiga axial, passou a abranger também o processo de obtenção da liga final que está descrito no item 3.3.

As ligas ensaiadas nesta pesquisa foram fundidas com composições conforme Tabela 7 referente à liga 5083 e Tabela 8 referente à liga 5182. Este estágio do processo recebe o nome de liberação de fusão.

A identificação do processo de fabricação para garantia do produto e de rastreabilidade para as duas ligas estão nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Identificação da liberação de fusão da liga AlMg 5083.

Liberação de Fusão:
- Liga 5083 / 5C / AlcanBrasil
- Número da fusão: 54333 - 36 / DCB
- Data da análise: 2000 - 07 -21, 15:26:36
- Data da liberação: 2000 - 09 - 25, 09:57:42
- Responsável: Fernando

Tabela 6 - Identificação da liberação de fusão da liga AlMg 5182.

Liberação de Fusão:
- Liga 5182 / 5B / AlcanBrasil
- Número da fusão: 54413 - 15 / DCB
- Data da análise: 2000 - 07 -26, 20:35:42
- Data da liberação: 2000 - 09 - 25, 09:58:10
- Responsável: Dino

Tabela 7 - Composição da liga AlMg 5083, na fusão.

Elementos	Porcentagem dos elementos da liga 5083, na fusão [%]			
	início	meio	fim	média
Al	94,44	94,46	94,54	94,48
Cu	0,03	0,03	0,03	0,03
Fe	0,36	0,35	0,35	0,35
Mg	4,50	4,49	4,42	4,47
Mn	0,43	0,43	0,43	0,43
Si	0,09	0,09	0,09	0,09
Ti	0,04	0,04	0,04	0,04
Cr	0,06	0,06	0,06	0,06
Zn	0,01	0,01	0,01	0,01
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00
Bi	0,00	0,00	0,00	0,00
Pb	0,000	0,000	0,000	0,000
Sn	0,000	0,000	0,000	0,000
B	0,001	0,001	0,001	0,001
Be	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Ga	0,01	0,01	0,01	0,01
Li	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Na	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
V	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabela 8 - Composição da liga AlMg 5182, na fusão.

Elementos	Porcentagem dos elementos da liga 5182, na fusão. [%]			
	início	meio	fim	media
Al	94,63	94,59	94,65	94,62
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,26	0,26	0,26	0,26
Mg	4,61	4,64	4,58	4,61
Mn	0,34	0,34	0,34	0,34
Si	0,11	0,11	0,11	0,11
Ti	0,016	0,016	0,016	0,016
Cr	0,01	0,01	0,01	0,01
Zn	0,01	0,01	0,01	0,01
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00
Bi	0,00	0,00	0,00	0,00
Pb	0,001	0,001	0,001	0,001
B	0,001	0,001	0,001	0,001
Be	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ca	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ga	0,01	0,01	0,01	0,01
Li	0,000	0,000	0,000	0,000
Na	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
V	0,01	0,01	0,01	0,01

Na Alcan foram analisadas amostras desses materiais sólidos, com algumas operações de transformação, durante o processo e obtiveram-se os dados específicos, conforme Tabela 9:

Tabela 9 - Composição química dos materiais das ligas após laminador Tandem.

Elementos de liga	Porcentagem em peso dos elementos de liga (média de 2 amostras com 3 réplicas)		Comparação percentual dos elementos de liga	
	A AlMg 5083	B AlMg 5182	Relativa [B-A]	Variação {[B-A]/A} 100%
Cu	0,03	0,008	- 0,022	- 73.3
Fe	0,345	0,25	- 0,095	- 27,5
Mg	4,43	4,45	0,02	0,45
Mn	0,43	0,355	- 0,075	- 17,44
Ni	0,003	0,002	- 0,001	- 33,3
Si	0,09	0,0985	0,0085	9,4
Ti	0,042	0,019	- 0,023	- 54,7
Zn	0,011	0,0055	- 0,0055	- 50
Bi	0,000	0,000	0,000	-
Cr	0,06	0,006	- 0,054	- 90
B	0,001	0,001	0,000	-
Ga	0,013	0,012	- 0,001	- 7,7
V	0,009	0,0085	- 0,0005	- 5,5
Pb	0,00	0,001	0,001	-
Ca	0,000	0,000	0,000	-
Sn	0,000	0,000	0,000	-
Li	0,000	0,000	0,000	-
Na	0,000	0,000	0,000	-

Observações: A Tabela 9 fornece as porcentagens em peso dos elementos de liga contidos nos dois materiais em estudo, sendo que os principais efeitos destes elementos nas características mecânicas destes materiais são:

O magnésio (Mg) em peso é o elemento de liga mais endurecedor nas ligas trabalháveis e seus teores estão diretamente relacionados com a maior/menor resistência mecânica das ligas da série 5XXX. O manganês (Mn) vem em seguida, mas tem a tendência de se precipitar e formar fases intermetálicas principalmente com o ferro (Fe) e silício (Si). As ligas da série 5XXX que apresentam menores teores de Mn, Fe e Si, portanto menores quantidades de partículas de 2ª Fase (intermetálicas). Assim sendo menor intermetálicos corresponde à melhor formabilidade. O cromo (Cr) é adicionado para inibir a recristalização e crescimento de grãos após o recozimento (BARILE, 1981).

A Tabela 10 fornece os resultados dos ensaios de tração específicos dos dois materiais em estudo: AlMg 5083 e AlMg 5182 nas três condições de têmperas.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas das ligas AlMg 5083 e 5182 "Alcan".

(dados fornecidos pelo fabricante)

		Ensaio destrutivo de tração					
		Liga AlMg 5083			Liga AlMg 5182		
		σ_u	σ_e	Along.	σ_u	σ_e	Along.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
Têmperas	O	275	130	16	263	125	21
	H32	305	230	10	299	215	12
	H34	330	267	8	322	267	11

3.3 MÉTODOS

Para que fosse possível obter corpos-de-prova dos materiais recebidos do fornecedor (Alcan), as matérias-primas tiveram que passar por transformações em laboratórios, para estarem nas especificações desejadas, isso porque o material fornecido foi retirado no meio do processo de fabricação, após o laminador Tandem, portanto houve a necessidade de se dar seqüência a partir deste ponto até chegar às características desejadas de cada material.

A pesquisa passa pelo processamento dos materiais, pela confecção dos corpos-de-prova e pelos ensaios. Pode-se dizer que a metodologia desenvolvida é uma combinação de ensaios não destrutivos, tratamentos térmicos, usinagem, conformação e ensaios destrutivos. Os procedimentos passo a passo desta metodologia estão demonstrados em fluxograma do processo Figuras 10 e 11 e seus detalhes na descrição do processo.

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	AGREGA VALOR ?
	operação	sim
	transporte	não
	inspeção	não
	armazenamento	não
	espera	não

Figura 10 - Simbologia básica para processo produtivo.

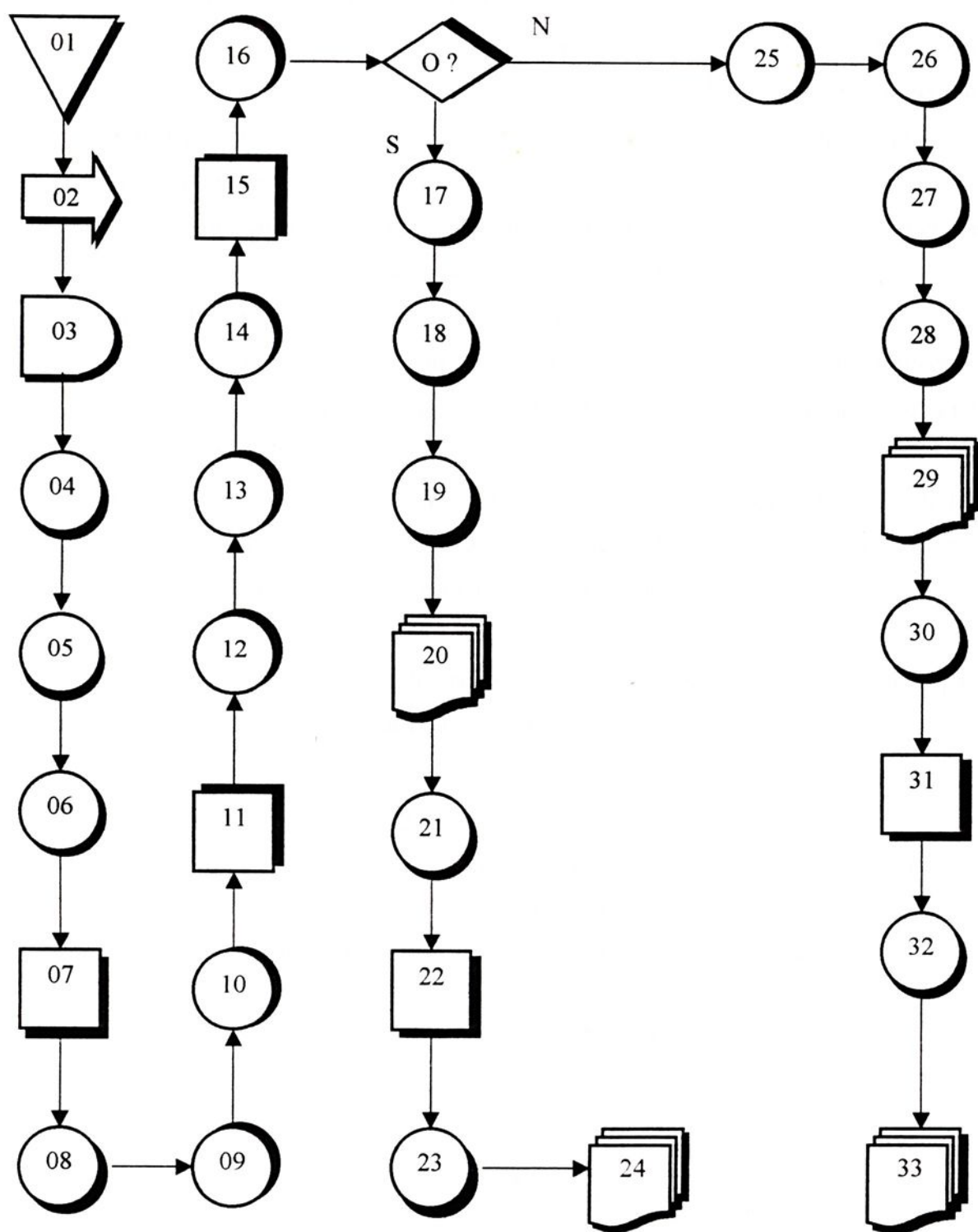


Figura 11 - Fluxograma do processo de fabricação e método de ensaio de fadiga axial.

3.3.1 Descrição do Processo passo a passo.

O processo dimensional básico é transformar a matéria-prima inicial de 26 mm de espessura para uma final de laminação de 7 mm, que é a dimensão comum para confecção dos corpos-de-prova necessários: diâmetro de 5 mm para os cdp's de fadiga axial e espessura de 4 mm para cdp's de ensaio de tração.

É importante salientar que é imprescindível uma atenção especial durante as etapas do processo no que tange à identificação das ligas, pois visivelmente elas são idênticas.

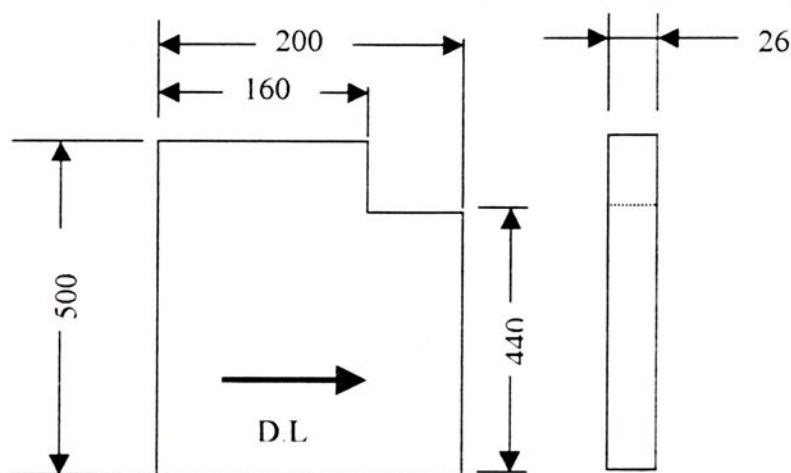
Os tipos de corpos-de-prova necessários foram:

- Cdp's para ensaio de tração: liga 5083 na condição "O", longitudinal e transversal ao sentido da laminação; na condição "H32", longitudinal e transversal; e na condição "H34", longitudinal e transversal. Idem para a liga 5182.
- Cdp's para ensaio de fadiga axial: liga 5083 na condição "O", longitudinal e transversal ao sentido da laminação; na condição "H32", longitudinal e transversal; e na condição "H34", longitudinal e transversal. Idem para a liga 5182.

Para se chegar aos resultados desejados nas condições existentes, deve-se seguir passo a passo o processo e a metodologia descrita a seguir:

01- Armazenamento da matéria-prima Alcan.

As matérias-primas de pesquisa são quatro placas de 26 mm de espessura, sendo duas da liga AlMg 5083 e duas da liga 5182, estas foram retiradas no meio do processo de fabricação após o laminador Tandem, e com dimensões conforme Figura 12.



*Dimensões em mm.

*D.L-direção de laminação.

Figura 12 - Matéria-prima: ligas de AlMg 5083 e AlMg 5182.

As partes das placas faltantes de 40x60x26mm, representam as amostras que foram retiradas para análises, sendo que as imagens resultantes das microscopias realizadas pela Alcan, encontram-se nos ANEXOS A e B, referentes às ligas 5083 e 5182 respectivamente.

02- Transporte da matéria-prima de Pindamonhangaba (Alcan) até Guaratinguetá (FEG-UNESP).

03- Requisição de serviço de usinagem e espera até sua execução.

Todas as etapas do processo foram executadas em órgãos oficiais (FEG-UNESP e DEMAR-FAENQUIL) e por funcionários destas instituições, portanto qualquer tipo de serviço por questão de regulamento exige procedimentos próprios, tais como: requisição autorizada pela autoridade competente e conseqüentemente aguardar a ordem de programação do setor executor.

04- Usinagem da matéria-prima, corte e preparação das partes para a 1ª laminação.

Além de separar partes que devem ser transformadas em condições de têmperas diferentes (O, H32 e H34) e de anisotropia no sentido da laminação e transversal a esta, as dimensões dos fornos e do laminador também devem ser levadas em conta para que seja possível executar as operações do processo. Uma das providências é a preparação das partes que irão ser laminadas onde as bordas devem ser chanfradas ou arredondadas para que minimize as trincas laterais que condenariam o material laminado. A Figura 13 ilustra tal procedimento.

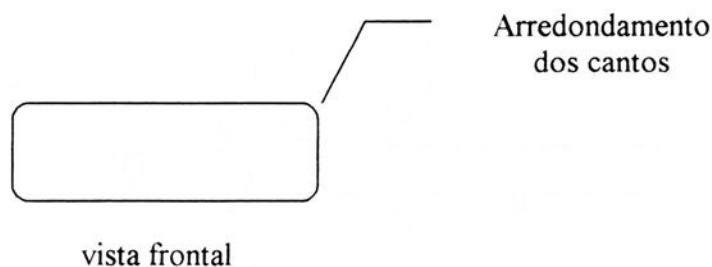


Figura 13 - Vista frontal de material a ser laminado.

05- 1ª laminação redução de 26 para 13 mm na espessura.

Seguindo instruções do fabricante para manter a reprodutividade do processo produtivo, neste estágio da 1ª laminação fez-se, uma redução no mínimo de 50 % da espessura inicial, em vários passes no laminador, para eliminar vazios ou defeitos internos de fundição. Um fator importante nas operações de laminação de alumínio e suas ligas é a lubrificação das partes externas das peças que se atritam com os rolos do laminador, com um lubrificante fornecido pelo fabricante (Alcan).

Pode-se observar que a cada passe de laminação as peças aqueciam-se significativamente, necessitando do uso de luvas protetoras especiais para que se pudesse executar todos os passes necessários. As Figuras 14 e 15, ilustram as operações de laminação e o equipamento utilizado para laminação respectivamente.

Após o material ter sido laminado totalmente, observou-se que ao longo das bordas do material processado apareceram trincas visíveis a olho nu, o que mostra uma região altamente tencionada no processo de laminação, e que deverá ser retirada do corpo das peças. As partes selecionadas (corpo usinado sem trincas visíveis a olho nu) deverão ser submetidas a ensaios não destrutivos através de líquidos penetrantes para verificação da existência de micro trincas (não visíveis a olho nu) oriundas do processo de laminação.

1ª laminação: redução de 50 %, espessura inicial de 26 mm para final de 13 mm.

$$[(e_f - e_o) / e_o] \cdot 100 = -50\%$$

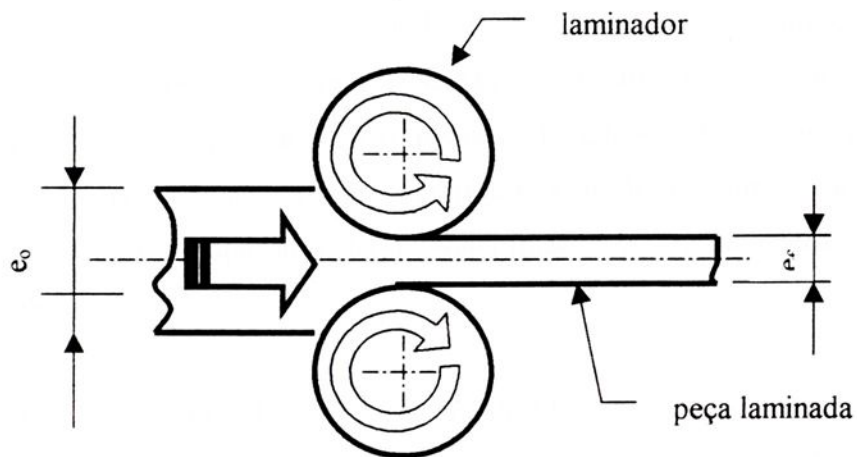


Figura 14 - Representação esquemática da 1ª laminação.

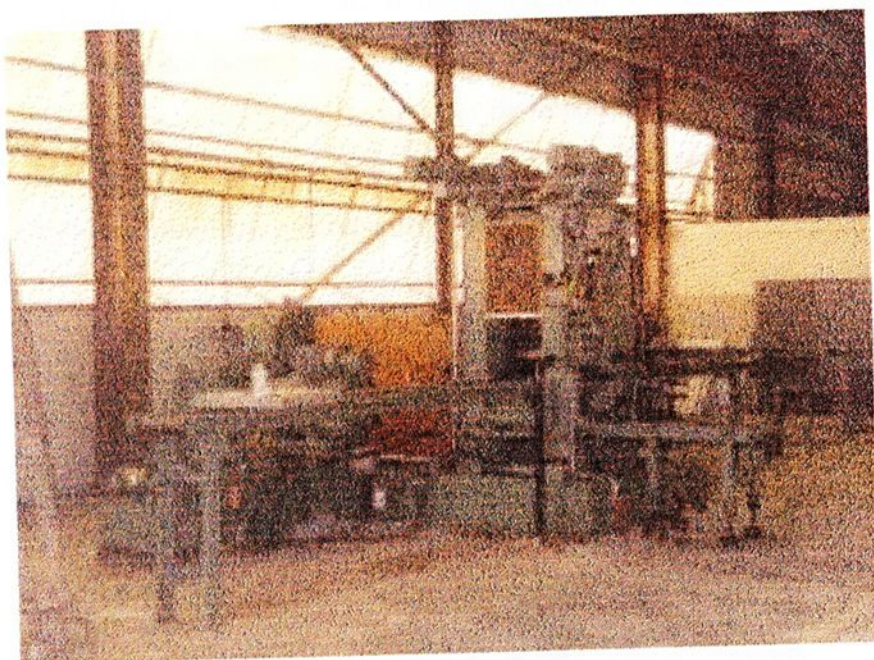


Figura 15 - Laminador Fenn Manufacturing Newington Connecticut, modelo 12V3.5, série 52620, laboratório do DEMAR-FAENQUIL.

06- Usinagem: corte nas laterais das peças laminadas.

Nesta operação simplesmente eliminam-se através de usinagem as laterais trincadas, visíveis a olho nu, das peças oriundas da laminação. As partes centrais seguem para ensaios não destrutivos para a verificação de microtrincas.

07- Ensaio não destrutivo - inspeção por líquidos penetrantes.

Neste ensaio simplesmente limpa-se as superfícies das peças a serem inspecionadas, adiciona-se um líquido que penetra em micro fissuras superficiais, através do princípio da atração por capilaridade, e após um certo período de tempo adiciona-se um spray revelador e num pequeno intervalo de tempo as trincas superficiais estarão evidenciadas com o contraste dos produtos aplicados. Nesta etapa foram inspecionadas todas as peças da primeira laminação.

08- Recozimento das peças laminadas com espessura de 13 mm.

Todas as peças nesta etapa estão com espessura de 13 mm e deverão ser submetidas ao tratamento térmico de recozimento, para que se processe em seguida novos encruamentos por laminações. A importância desta etapa é permitir deformações sem criar micro trincas

externas e internas nas peças, pois os cristais voltam a condição inicial, ou seja, sem deformações e conseqüentemente sem tensões internas. O recozimento se processa elevando a temperatura das peças da ambiente até $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, num tempo aproximado de 30 minutos, aguarda-se a estabilização neste patamar de temperatura e mantêm-se as peças no forno nestas condições por quatro horas, em seguida desliga-se o forno e espera-se o resfriamento. A Figura 16 ilustra o equipamento e a Figura 17 a curva de recozimento.



Figura 16 - Forno Degussa-Durferfrit KO, temperatura máxima de 1.000°C para tratamento térmico, laboratório do DMT-FEG.

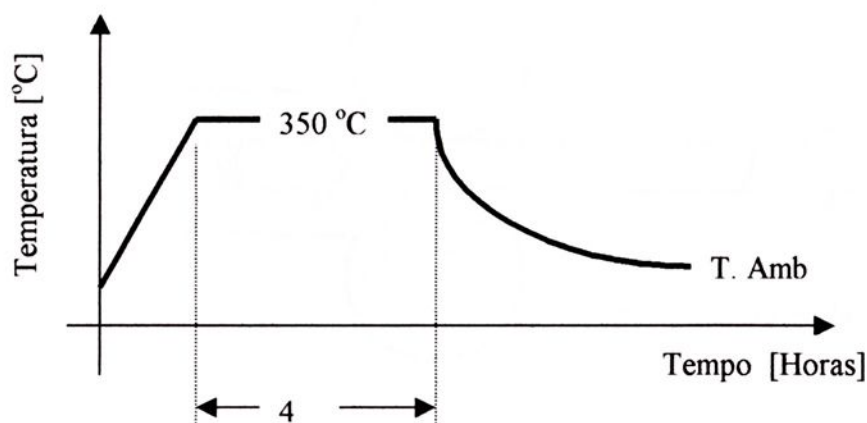


Figura 17 - Curva de recozimento para ligas de alumínio-magnésio.

09- 2ª laminação - materiais recozidos com espessura de 13 mm.

Nesta operação há a necessidade de separar as partes que irão compor a matéria-prima para as têmperas “O”, “H32”, e “H34”, porque o grau de deformação é diferenciado para cada caso, conforme Figura 18 e descrição a seguir:

- a) parte reduzida de $e_i = 13 \text{ mm}$ (recozida), para $e_f = 8,5 \text{ mm}$, refere-se a parte que irá compor os materiais nas têmperas “O” e “H32”, para as ligas AlMg 5083 e AlMg 5182.

Observação: a dimensão de 8,5 mm é resultante da penúltima laminação, sendo que a próxima e final será de 7 mm, correspondente a 18 % de redução que é o que caracteriza a tempera “H32” para as ligas em estudo. Com relação aos materiais de têmperas “O”, após a última laminação é necessário que passem por tratamento térmico de recozimento novamente.

- b) parte reduzida de 13,0 mm (recozida) para 10,8 mm, refere-se a penúltima laminação que é a preparação para uma próxima redução de 35% (de 10,8 para 7 mm) na espessura que é a que produz a tempera “H34”. Estes valores de redução são específicos para cada tipo de liga e constituem dados confidenciais dos fabricantes.

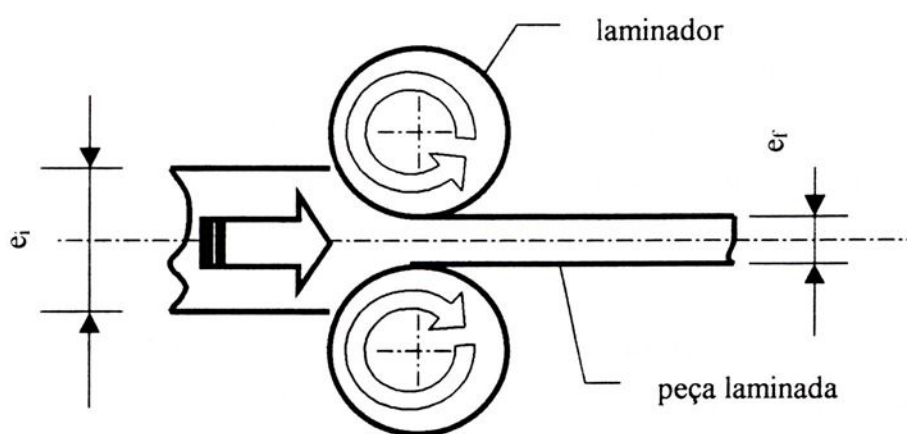


Figura 18 - Representação esquemática da 2ª laminação.

10- Corte das peças da 2ª laminação, retiradas das laterais trincadas.

Mesmo procedimento da etapa 06.

11- Inspeção por líquidos penetrantes.

Mesmo procedimento da etapa 07.

12- Tratamento térmico de recozimento.

Mesmo procedimento da etapa 08.

13- 3ª laminação e última.

Todas as peças deverão ter espessura final de 7,0 mm, sendo que as que forem para a condição de têmpera “O” deverão ser recozidas novamente, e as que forem para as condições “H32” e “H34”, deverão ser submetidas a tratamento térmico de estabilização para alívio de tensões causadas no processo de laminação. Neste processo de laminação como nos anteriores foram executados em vários passes, e mesmo assim com todo o cuidado houve trincas grandes nas bordas das peças laminadas.

14- Corte das peças para todo lote (“O”, “H32” e “H34”).

Mesmo procedimento da etapa 06 e 10.

15- Inspeção por líquidos penetrantes para todo material oriundo da 3ª laminação.

Mesmo procedimento dos itens 07 e 11.

16- Tratamento térmico de recozimento.

Nesta etapa separa-se uma parte para confecção de corpos-de-prova das duas ligas na condição “O”, faz-se o recozimento conforme etapas 08 e 12, e continua o processo na sequência 17. O restante continua sendo processado no passo 25 (materiais para as têmperas H32 e H34).

17- Ensaio Não-destrutivo de dureza, das ligas na condição “O”.

Utilizando-se do aparelho ilustrado na Figura 19, foram executados seis ensaios ao todo, sendo três réplicas para a liga AlMg 5083, e três para a liga AlMg 5182. Os resultados finais com as especificações da regulagem do equipamento de ensaio estão na Tabela 13.



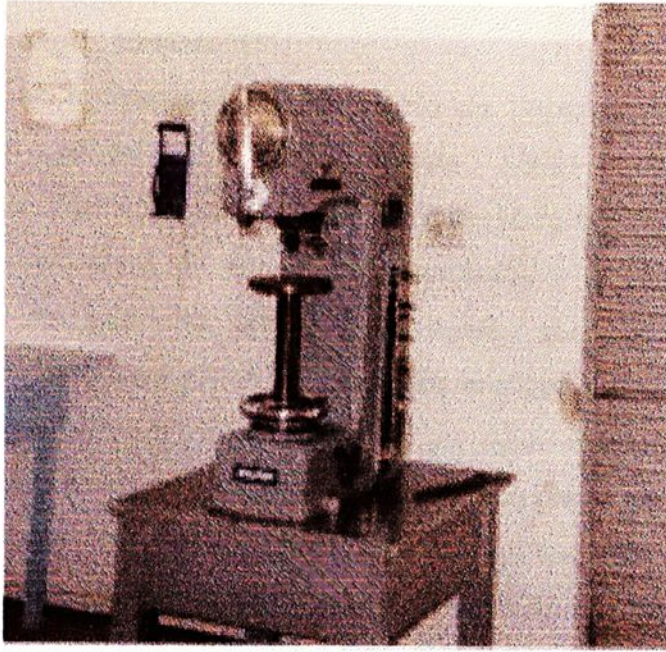
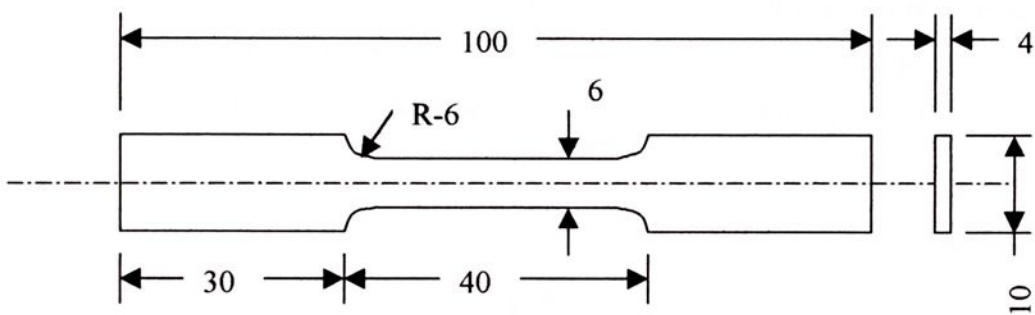


Figura 19 - Aparelho para ensaio de dureza, tipo Diatestor 2 RC, marca Wolpert, laboratório DMT-FEG.

18- Confeção e inspeção de cdp's para ensaio de tração na condição "O".

A Figura 20 fornece as dimensões para corpos-de-prova para ensaios de tração, comum para as condições "O", "H32" e "H34".



(dimensões em mm)

Figura 20 - Dimensões dos corpos-de-prova, para ensaio de tração (ASTM, E 466 - 82).

19- Ensaio de tração, têmpera "O".

Utilizando-se de equipamento do laboratório do Departamento de materiais da FEG (Máquina Universal de Ensaio, EMIC: Modelo - MEM 10.000), foram ensaiados dois cdp's (conforme Figura 20) para cada tipo de material na condição "O". Este equipamento trabalha com velocidade de ensaio pré-determinada e o início do ensaio registra o deslocamento no eixo das abscissas, indicando que ainda não se procedeu o aprisionamento do cdp nas garras. Nos casos de escorregamento durante o ensaio do cdp das garras o equipamento registra na curva um dente indicando um descarregamento. Estes dois casos foram constatados durante os ensaios e podem ser observados no APÊNDICE A: na primeira curva o início com deslocamento sem carga e na terceira curva um escorregamento provocando um descarregamento na região elástica.

As curvas geradas pelo equipamento de ensaio de tração estão no APÊNDICE A.

20- Registros dos ensaios de tração na condição "O".

A Figura 21, mostra as dimensões e o posicionamento da região que será rompida no ensaio destrutivo de tração. O equipamento de ensaio em linhas gerais fixa através de garras alojadas em dois cabeçotes alinhados, as extremidades dos corpos-de-prova e tracionam os mesmos até se romperem, sendo que no decorrer dos ensaios as forças aplicadas vão aparecendo num visor, e duas dessas forças o equipamento registra. Essas forças são a carga máxima que os cdp's. resistem, e aquela em que se dá o rompimento, tais valores estão registrados na Tabela 11. Além do ensaio propriamente dito, o equipamento plota uma curva característica de força versus alongamento, de onde se reproduz a curva tensão versus deformação, conforme APÊNDICES A e B.

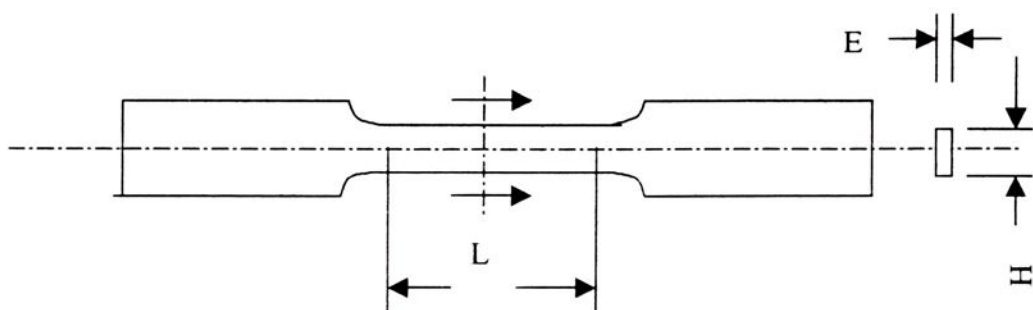


Figura 21 - Dimensões da região a ser rompida no ensaio de tração.

Tabela 11 - Dimensões dos corpos-de-prova referentes às regiões de ruptura, têmpera “O”, e os resultados dos carregamentos.

Corpos-de-Prova	Dimensões (Figura 21)						CARGA		
	[mm]								
	L		H		E		Máx.	Rup.	Esc.
	i inicial	f final	i inicial	f final	i inicial	f final			
A 5083L	30,00	37,83	5,97	5,28	3,98	3,29	710	660	390
B 5083T	30,00	38,57	5,96	5,12	3,98	3,17	660	640	300
C 5083L	30,00	38,67	5,97	5,14	4,11	2,91	750	660	340
D 5083T	30,00	38,75	5,95	5,18	4,08	3,08	240	210	110
E 5182L	30,00	38,42	5,98	4,94	4,04	3,08	310	240	-
F 5182T	30,00	38,14	5,98	4,84	4,06	2,88	660	610	280
G 5182L	30,00	38,93	5,97	5,08	4,08	3,15	700	660	340
H 5182T	30,00	38,40	5,96	4,97	4,06	3,11	710	650	350

Tabela 12 - Resultado dos ensaios de tração dos cdp's na condição "O".

Corpos-de-prova na têmpera "O"	Carga máx. $P_{\text{máx.}}$ [kgf.]	Área inicial $A_i = (H \times E)_i$ [mm ²]	Limite de resistência à tração $\sigma_{u \text{ máx.}} = [P_{\text{máx.}}/A_i] \cdot 9,8$ [MPa]
A 5083L	710	23,76	293
B 5083T	660	23,72	273
C 5083L	750	24,54	300
D 5083T	240	24,27	97
E 5182L	310	24,16	126
F 5182T	660	24,27	267
G 5182L	700	24,36	281
H 5182T	710	24,2	286

Observação: As tensões calculadas na Tabela 12 estão sub-dimensionadas devido as áreas utilizadas nos cálculos serem as iniciais, o que, na realidade estas dimensões seriam um pouco inferiores devido a estrição. Este fato acontece porque não é possível neste tipo de equipamento precisar as áreas no instante das cargas maiores, por esse motivo utiliza-se as áreas iniciais.

A importância de se buscar as tensões máximas é para estimar os valores das tensões a serem utilizadas nos ensaios de fadiga. Inicialmente testa-se com 75% da tensão máxima calculada no ensaio de tração, como o primeiro valor da tensão máxima utilizada no

ensaio de fadiga (baixo ciclo), e se esta não for adequada, faz-se o recálculo dos novos valores partindo desta referência até o ajuste final, ou seja, um processo iterativo.

21- Confeção de cdp's para ensaio de fadiga axial para as duas ligas na condição "O", conforme dimensões da Figura 22.

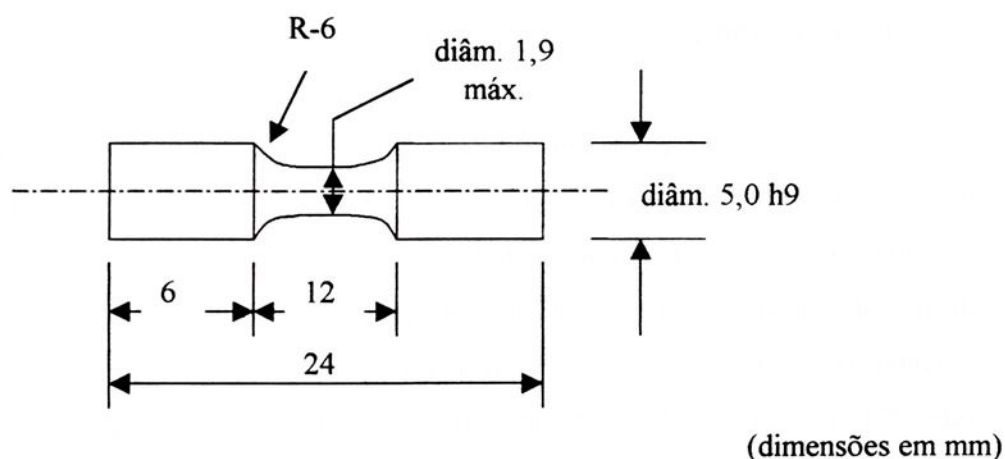


Figura 22 - Dimensões dos corpos-de-prova para ensaios de fadiga axial,
(ASTM, E 466 - 82).

22- Inspeção dimensional e aspecto visual dos cdp's de fadiga axial, têmpera "O".

É necessário uma inspeção dimensional, e visual total, ou seja, inspeção 100%, principalmente nos diâmetros, pois as extremidades se alojam em pinças que prendem os corpos de prova para serem tracionados, por esta razão dimensões maiores não passam e as menores que as especificadas não recebem aperto suficiente e acabam escorregando no momento do ensaio. Na região de diâmetro menor onde haverá o rompimento dos cdp's. as dimensões acima da especificação exigirão uma carga maior do equipamento devido ao aumento da área, forçando, ou até mesmo excedendo a capacidade deste. Quanto ao aspecto visual riscos ou rugosidades visíveis poderão acelerar o processo de fadiga provocando grandes dispersões nos resultados.

Estes cdp's foram confeccionados, porém não utilizados porque os resultados a serem obtidos estariam abaixo das curvas de fadiga axial nas outras condições ("H32" e "H34"), portanto os dados para efeito de comparação serão as tensões limites de escoamento.

23- Ensaios de fadiga axial para as duas ligas na condição “O”.

Para efeito deste estudo não foram necessários tais ensaios devido as tensões limites de escoamento das duas ligas na condição “O” estarem praticamente abaixo das regiões de limite de fadiga das condições “H32” e “H34”. Porém a citação do ensaio permanece para efeito da descrição do método.

24- Registros

Após a realização dos ensaios deve-se organizar os dados em tabelas, plotar as curvas características de fadiga axial e obter imagens microscópicas das superfícies de fratura.

25- Tratamento térmico de estabilização (continuação da etapa 16).

Este tratamento deve-se ser feito para aliviar tensões causadas pelo processo de laminação, especialmente aplicado nas ligas de alumínio-magnésio que são suscetíveis à corrosão sob tensão. Esse tratamento melhora a resistência a essa corrosão. Diminui de pouco o limite de resistência a tração e o limite de escoamento. Aumenta de pouco o alongamento. O tratamento consiste na elevação da temperatura da ordem de 150 °C, num forno para tratamento térmico, conforme Figura 23, por quatro horas e o resfriamento até a temperatura ambiente, conforme curva ilustrada na Figura 24 (BARILE, 1981).

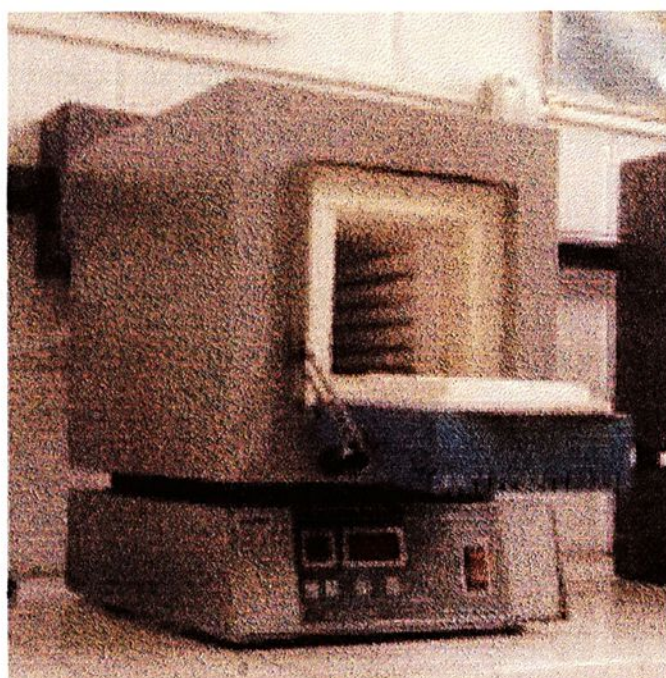


Figura 23 - Forno para tratamento térmico EDG-7.000, laboratório do DMT-FEG

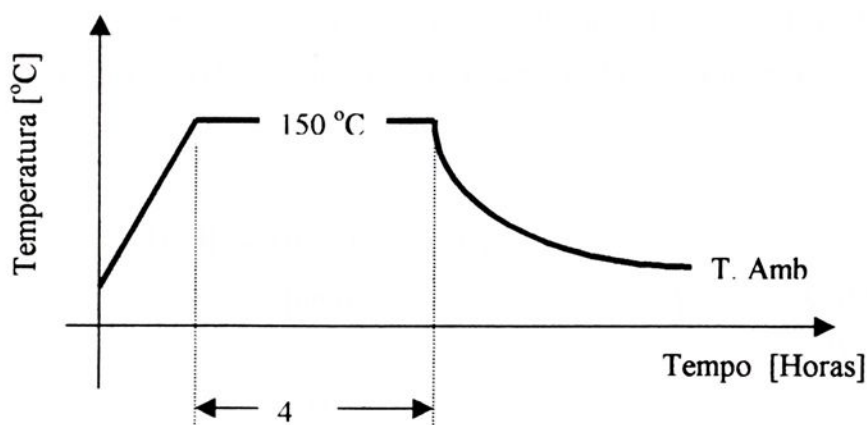


Figura 24 - Curva de estabilização das ligas alumínio-magnésio (H32 e H34).

26- Ensaio de dureza (têmperas “H32 e H34”).

Os mesmos procedimentos do passo 17. Os resultados também se encontram na Tabela 13.

27- Confeção e inspeção de cdp's. para ensaios de tração das ligas AlMg 5083 e 5182, nas condições H32 e H34, nas direções horizontais e transversais com relação ao sentido de laminação. Os mesmos procedimentos do passo 18.

28- Ensaio de tração, têmperas “H32 e H34”.

Os mesmos procedimentos do passo 19, sendo que as curvas geradas pelo equipamento de ensaio de tração estão no APÊNDICE B.

29- Registros dos ensaios de tração, têmperas “H32 e H34”.

Mesmo procedimento do passo 20.

As medições e os resultados estão na Tabela 13 e 14.

Tabela 13 - Dimensões dos corpos-de-prova referentes às regiões de ruptura, temperaturas “H32, e H34”, e os resultados dos carregamentos.

Corpo-de-Prova	DIMENSÕES (Figura 21), [mm]						CARGA [kgf]		
	L		H		E		Máx.	Rup.	Esc.
	inicial	final	inicial	final	inicial	final			
A(H32) 5083L	30,0	32,18	5,95	5,83	3,97	3,55	960	940	910
B(H32) 5083T	30,0	32,91	5,93	5,35	3,96	3,23	970	870	890
C(H34) 5083L	30,0	32,30	5,94	5,69	4,09	3,73	950	920	870
D(H34) 5083T	30,0	33,47	5,96	5,40	4,08	3,51	990	930	910
E(H32) 5182L	30,0	32,36	5,93	5,65	4,11	3,57	890	880	800
F(H32) 5182T	30,0	33,92	5,93	5,33	4,07	3,46	860	830	790
G(H34) 5182L	30,0	33,07	5,93	5,78	4,08	3,72	720	710	650
H(H34) 5182T	30,0	33,55	5,94	5,26	4,06	3,26	890	810	820

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de tração dos cdp's nas têmperas "H32 e H34".

Corpos-de-prova nas têmperas "H32 e H34"	Carga máx. $P_{\text{máx.}}$ [kgf.]	Área inicial $A_i = (H \times E)_i$ [mm ²]	Limite de resistência à tração $\sigma_u = [P_{\text{máx.}}/A_i] \cdot 9,8$ [MPa]
A(H32) 5083L	960	23,62	398
B(H32) 5083T	970	23,48	405
C(H34) 5083L	950	24,29	3,83
D(H34) 5083T	990	24,31	399
E(H32) 5182L	890	24,37	358
F(H32) 5182T	860	24,13	349
G(H34) 5182L	720	24,19	292
H(H34) 5182T	890	24,11	362

30- Confeção dos cdp's para ensaios de fadiga axial nas têmperas "H32 e H34".

Total de 240 cdp's conforme dimensões da Figura 22.

31- Inspeção dimensional e visual dos cdp's para ensaios de fadiga axial das duas ligas nas têmperas "H32 e H34".

Mesmo procedimento do passo 22.

32- Ensaio de fadiga axial ("H32 e H34").

Os procedimentos descritos a seguir são padrões para todos os ensaios de fadiga axial e estão divididos em descrição do equipamento e o ensaio propriamente dito.

- Descrição do equipamento: O equipamento para ensaios de fadiga axial, resume-se a dois cabeçotes alinhados que prendem as extremidades dos corpos de prova através de pinças, sendo que um deles é móvel e possui uma mola calibrada de onde se aplica a carga média, e o outro cabeçote fixo que está ligado a um volante excêntrico que imprime as cargas oscilatórias desejadas no ensaio. Portanto o equipamento e seus sistemas de regulagens são mecânicos, conforme ilustra a Figura 25.

Um detalhe sobre a preparação de um ensaio na máquina é que são necessários operar com 15 (quinze) parafusos Allen de duas bitolas diferentes, desta forma para cada ensaio completo são manipulados 30 vezes tais parafusos. Para todos os ensaios utilizou-se a frequência de 40 Hz.

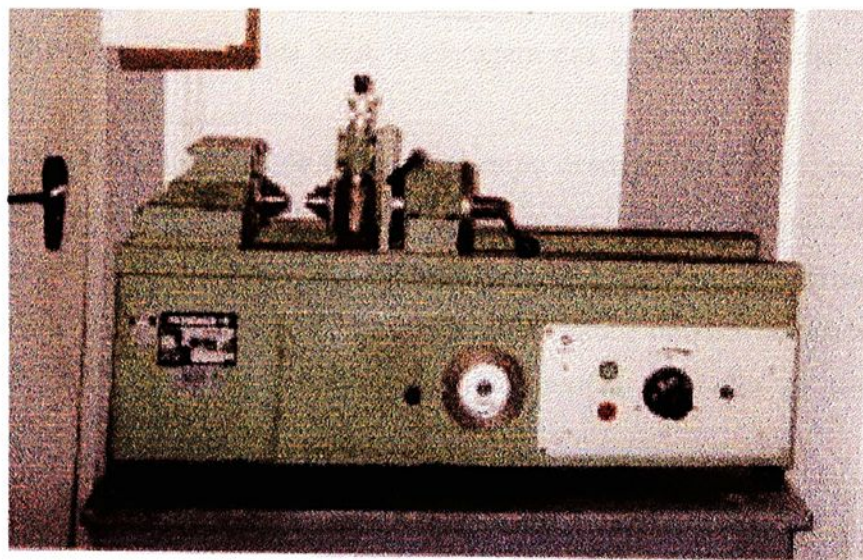


Figura 25 - Máquina para ensaio de fadiga axial, marca Carl Schenckm, modelo PHOG
- laboratório do DMT da FEG.

- Ensaio de fadiga axial: As características dos ensaios são de: $R = 0,1$, carregamentos flutuantes conforme Figura 7, quatro níveis de tensões com média de três réplicas por ponto, nos casos de grandes dispersões repete-se o ensaio. Em linhas gerais calcula-se a menor área do cdp. na região prevista para o rompimento e com a tensão pré-determinada do ensaio de tração, que é uma certa porcentagem da resistência mecânica do material, obtém-se a força necessária. Desta força calculada faz-se uma correção para a curva característica do equipamento de ensaio, com este novo valor e o cdp. fixado ajusta-se o equipamento, anota-se o valor indicado no odômetro, com todo esse procedimento inicia-se o ensaio aguardando até que o cdp. se rompa, anota-se a nova indicação do odômetro e com a diferença entre este e o valor anterior, obtém-se o número de ciclos que o material resistiu até se romper na tensão especificada. Desta forma para cada ponto foram realizados diversos ensaios e a média destes é que foi considerado como final. Assim a tensão aplicada e a média de ciclos formam pontos que determinam as curvas características de fadiga axial dos materiais.

33- Registros dos ensaios de fadiga axial, e plotagem das curvas características de cada material.

Os resultados obtidos dos ensaios de fadiga axial estão descritos no Item 4, constando de tabelas e plotagem das curvas características de fadiga axial. Para cada situação das duas ligas nas condições "H32" e "H34" foram selecionados cdp's para análise microscópica das superfícies rompidas por fadiga axial. Estas imagens foram obtidas no laboratório do DEMAR-FAENQUIL, no equipamento MEV- microscopia eletrônica de varredura, as quais encontram-se nos APÊNDICES: C, D, E, F, G, H, I e J.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A demonstração dos resultados dos ensaios realizados resume-se na organização dos dados obtidos através de tabelas e curvas, exceto no caso do ensaio de dureza que está registrado somente na forma de tabela. As discussões pertinentes vêm depois dos resultados para melhor compreensão.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DUREZA DAS LIGAS AlMg 5083 E 5182

Tabela 15 - Ensaio de dureza das ligas AlMg 5083 e 5182.

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE DUREZA “HB”						
(DUREZA BRINELL - CARGA = 31,25 kgf, TEMPO DE CARGA: 30s, PENETRADOR :AÇO TEMPERADO Ø 2,5 mm)						
ENSAIOS	LIGA 5083			LIGA 5182		
	O	H32	H34	O	H32	H34
1º	67,8	98,6	105,0	63,8	92,6	98,6
2º	67,3	98,6	105,0	61,7	98,6	92,6
3º	67,3	105,0	95,5	62,9	95,5	109,0
MÉDIA	67,5	100,7	101,8	62,8	95,6	100,1

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5182, TÊMPERA “O”.

Excepcionalmente os ensaios de fadiga axial para as duas ligas na condição “O” (recozido), não foram necessários, porque os limites de escoamento (σ_e), estão abaixo das regiões de tensões limite de fadiga para as outras condições de tratamento: “H32” e “H34”. Este fato demonstra que em termos de fadiga axial, estas ligas nas condições “O” são inferiores em relação as outras condições mencionadas acima.

O limite de escoamento máximo (σ_e) da liga AlMg 5182 é de 142 MPa e os limites de fadiga axial para as outras condições estão na ordem de 215 MPa. A Figura 26, ilustra esta constatação.

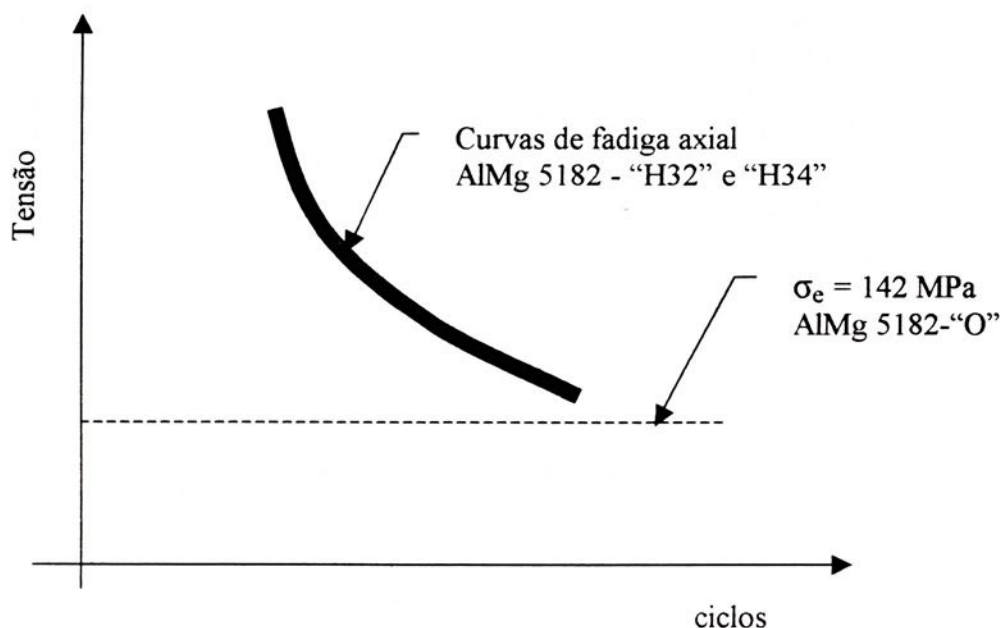


Figura 26 - Representação das resistências de fadiga axial da liga 5182 na condição “O” com relação às têmperas “H32” e “H34”.

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5182, LONGITUDINAL, H32.

Tabela 16 - Ensaio de fadiga axial da AlMg 5182, longitudinal, H32,.

Ensaio para plotar a curva 02: AlMg 5182, “H32”, longitudinal		
ENSAIO	TENSÃO [MPa]	CICLOS
17 18 19	303	72.800 33.100 27.800
20 21	279.3	52.600 79.600
22 23 24	247	133.400 3.471.400 606.700
14 15 16	215	>3.465.400 369.400 402.000

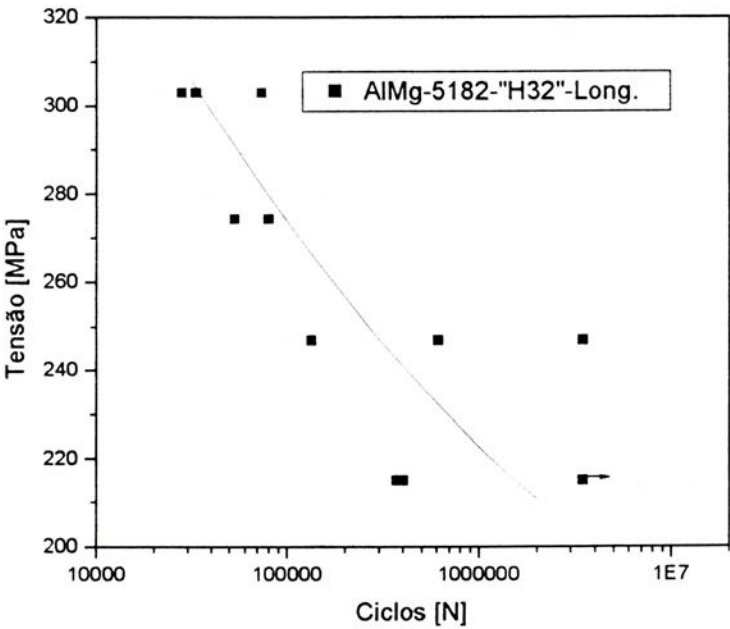


Figura 27 - Curva de fadiga axial da liga AlMg 5182, têmpera “H32”, longitudinal.

4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5182, TRANSVERSAL, “H32”

Tabela 17 - Ensaio de fadiga axial da AlMg 5182, transversal, “H32”.

Ensaio para plotar a curva 03: AlMg 5182, “H32”, transversal		
ENSAIO	TENSÃO [MPa]	CICLOS
41 42	303	20.500 77.600
38 39 40	279.3	154.800 34.600 141.500
36 37 85 86 87	247	94.000 102.000 112.500 285.100 248.600
34 35	215	>7.048.800 >7.047.400

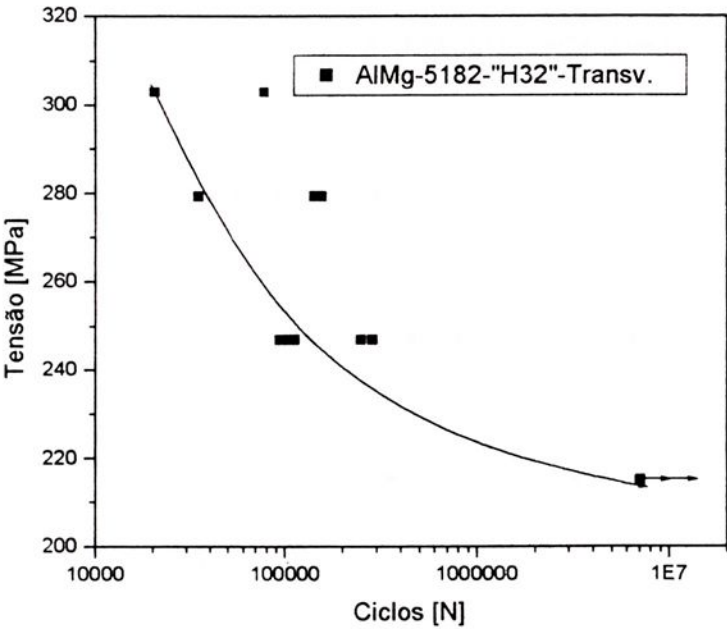


Figura 28 - Curva de fadiga axial da liga AlMg 5182, têmpera “H32”, transversal.

4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg. 5182, LONGITUDINAL, H34.

Tabela 18 - Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5182, “H34”, longitudinal”.

Ensaio para plotar a curva 04, liga AlMg 5182, “H34”, longitudinal		
ENSAIO	TENSÃO [MPa]	CICLOS
54 55	303	176.500
		108.700
56 57 58 59	279,3	306.500
		57.100
		93.100
		178.900
60 61 62 63 64	247	>6.440.900
		801.700
		466.300
		>6.753.000
		1.030.600
65 66 67	215	>7.339.600
		362.700
		>3.302.800

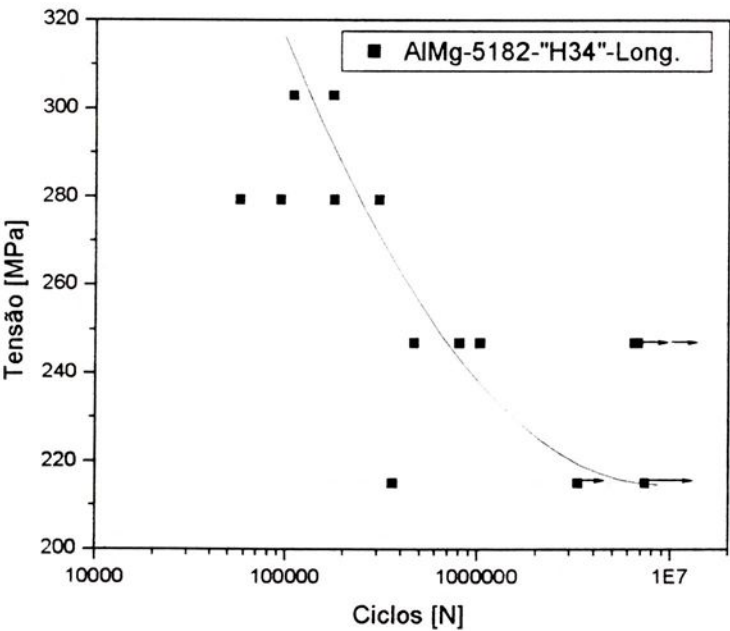


Figura 29 - Curva de fadiga axial da liga AlMg 5182, têmpera “H34”, longitudinal.

4.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5182, TRANSVERSAL, H34.

Tabela 19 - Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5182, “H34”, transversal.

Ensaio para plotar a curva 05, liga AlMg 5182, “H34”, transversal		
ENSAIO	TENSÃO [MPa]	CICLOS
75 76	303	98.600 106.900
77 78	279.3	150.100 145.900
79 80 81 82 83 84	247	238.000 >3.483.800 170.600 >1.945.500 >4.598.000 >7.430.000
	215	-

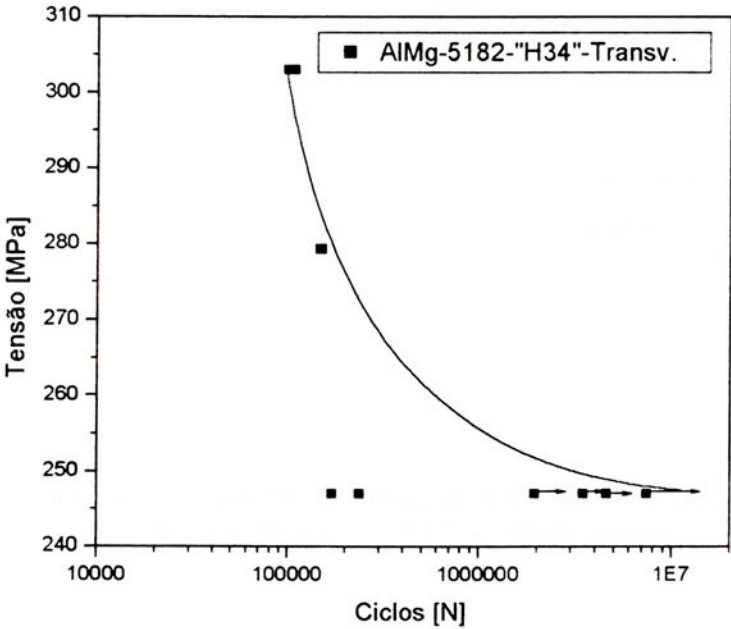


Figura 30 - Curva de fadiga axial da liga AlMg 5182, têmpera “H34”, transversal.

4.7 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5083, TÊMPERA "O".

Esta condição é semelhante a mencionada no Item 4.2, e apresenta uma tensão de escoamento (σ_e) também abaixo dos limites de fadiga axial para as condições "H32" e "H34".

O limite de escoamento máximo (σ_e) da liga AlMg 5083 é de 161 MPa e os limites de fadiga axial para as outras condições estão na ordem de 215 MPa. A Figura 31, ilustra esta constatação.

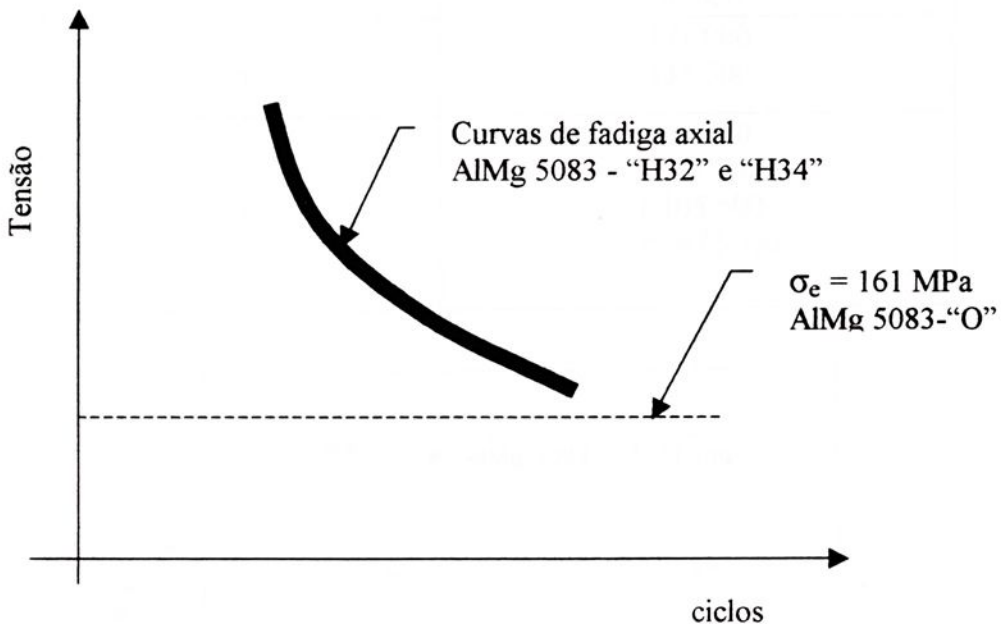


Figura 31 - Representação das resistências de fadiga axial da liga 5083 na condição "O" com relação às têmperas "H32" e "H34".

4.8 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg. 5083, LONGITUDINAL, H32.

Tabela 20 - Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5083, “H32”, longitudinal.

Ensaio para plotar a curva 07, liga AlMg 5083, “H32”, longitudinal		
ENSAIO	TENSÃO [MPa]	CICLOS
05	303	42.400
06		58.800
07		47.700
08	279.3	95.400
09		>3.578.800
10		70.900
11	247	171.900
12		135.500
01	215	906.700
02		2.127.700
03		1.105.600
04		>10.672.000

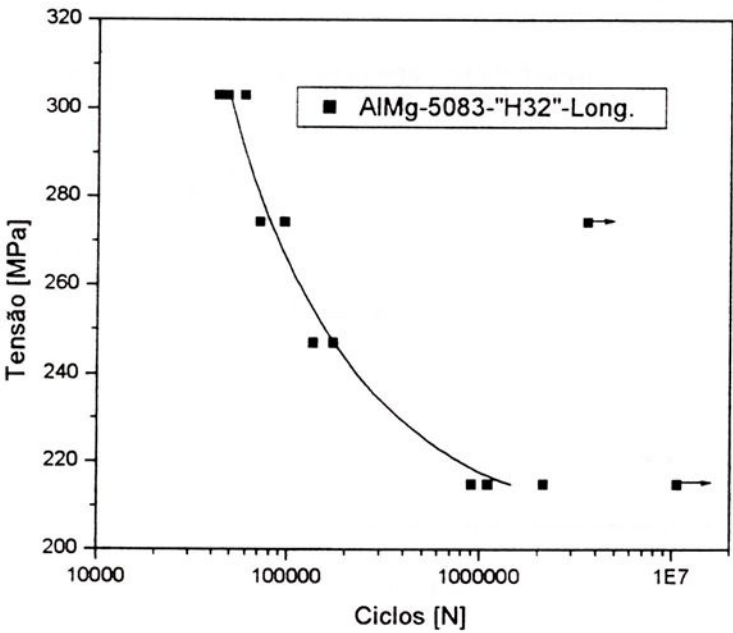


Figura 32 - Curva de fadiga axial da liga AlMg 5083, têmpera H32, longitudinal.

4.9 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5083, TRANSVERSAL, H32.

Tabela 21 - Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5083, transversal, H32,.

Ensaio para plotar a curva 08, liga AlMg 5083, “H32”, transversal		
ENSAIO	TENSÃO [MPa]	CICLOS
32* 33*	303	13.700. 17.100
30* 31*	279.3	31.100 51.000
25 26 27	247	301.200 194.200 169.500
28 29	215	7.887.400 >9.769.300

*Corpos-de-prova retrabalhados: diâmetros da região de rompimento acima da especificação.

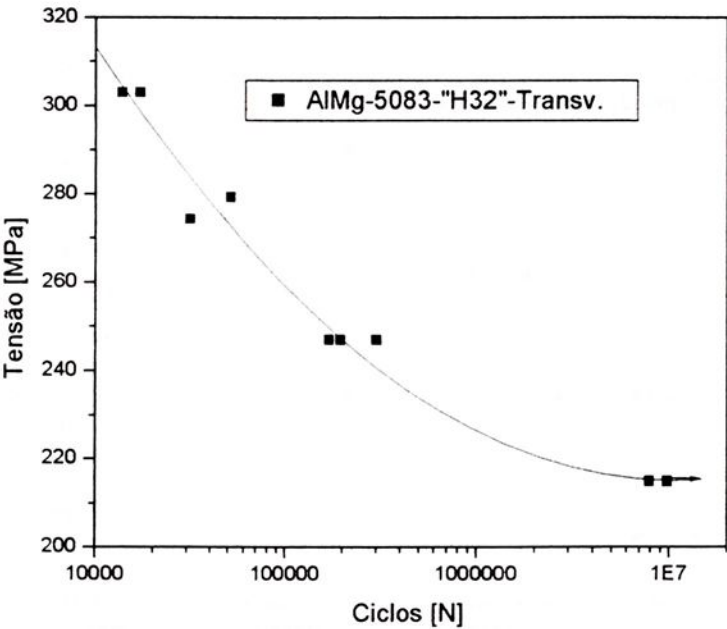


Figura 33 - Curva de fadiga axial da liga AlMg 5083, têmpera “H32”, transversal.

4.10 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5083, LONGITUDINAL, H34.

Tabela 22 - Ensaio de fadiga axial da liga AlMg 5083, longitudinal, H34,.

Ensaio para plotar a curva 09, liga AlMg 5083, “H34”, longitudinal.		
ENSAIO	TENSÃO [MPa]	CICLOS
52	303	339.100
53		211.200
49	279.3	>6.803.900
50		1.770.300
51		889.800
45	247	>6.584.500
46		201.900
47		2.581.000
48		>10.369.800
43	215	>6.504.500
44		>10.545.800

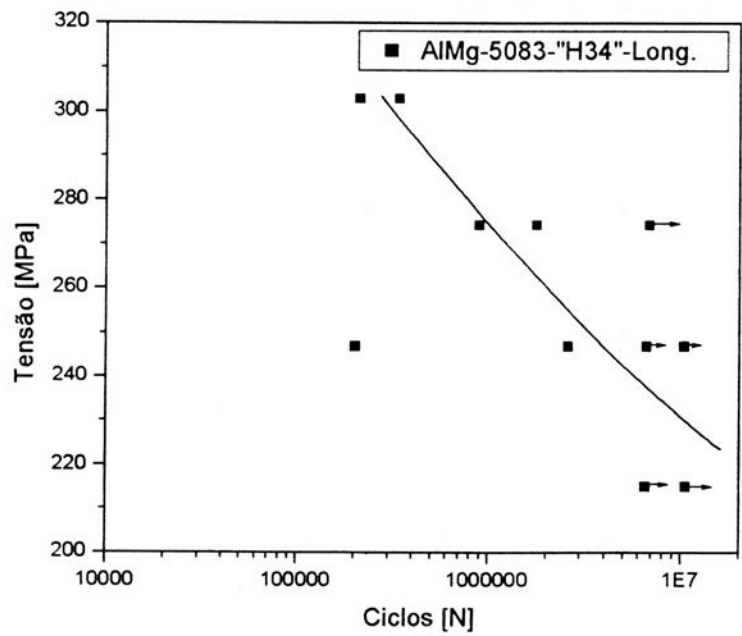


Figura 34 - Curva de fadiga axial da liga AlMg 5083, têmpera “H34”, longitudinal.

4.11 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL DA LIGA AlMg 5083, TRANSVERSAL, “H34”

Tabela 23 - Ensaio de fadiga axial da AlMg 5083, “H34”, transversal

Ensaio para plotar a curva 10, liga AlMg 5182, “H34”, transversal		
ENSAIO	TENSÃO [MPa]	CICLOS
68 69	303	262.300 164.500
70 71 72	279.3	761.300 >4.916.000 223.700
73 74	247	>3.524.800 >5.067.400
	215	-

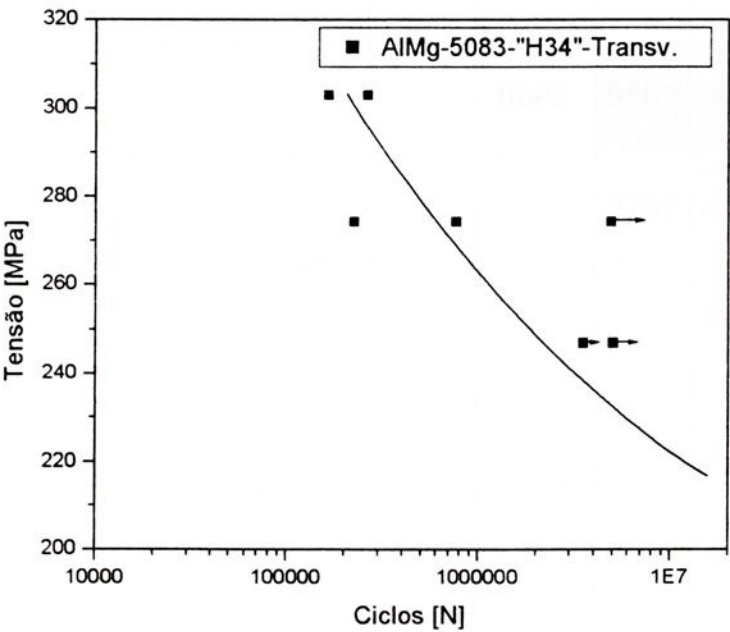


Figura 35 - Curva de fadiga axial da liga AlMg 5083, têmpera H34, transversal.

4.12 ORGANIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS PARA SELEÇÃO DAS CURVAS A SEREM COMPARADAS

Tabela 24 - Combinação das curvas para comparação das duas ligas submetidas a ensaios de fadiga axial.

	01- 5182 ("O")	02- 5182 (H32- long)	03- 5182 (H32- trans)	04- 5182 (H34- long)	05- 5182 (H34- trans)	06- 5083 ("O")	07- 5083 (H32- long)	08- 5083 (H32- trans)	09- 5083 (H34- long)	10- 5083 (H34- trans)
01-5182 ("O")	<i>I</i> 0101	<i>III</i> 0102	<i>III</i> 0103	<i>III</i> 0104	<i>III</i> 0105	<i>IV</i> 0106	<i>I</i> 0107	<i>I</i> 0108	<i>I</i> 0109	<i>I</i> 0110
02-5182 (H32- long)		<i>I</i> 0202	<i>II</i> 0203	<i>VI</i> 0204	<i>VI</i> 0205	<i>VI</i> 0206	<i>IV</i> 0207	<i>VI</i> 0208	<i>VI</i> 0209	<i>VI</i> 0210
03-5182 (H32- trans)			<i>I</i> 0303	<i>VI</i> 0304	<i>VI</i> 0305	<i>VI</i> 0306	<i>VI</i> 0307	<i>IV</i> 0308	<i>VI</i> 0309	<i>VI</i> 0310
04-5182 (H34- long)				<i>I</i> 0404	<i>II</i> 0405	<i>VI</i> 0406	<i>VI</i> 0407	<i>VI</i> 0408	<i>IV</i> 0409	<i>VI</i> 0410
05-5182 (H34- trans)					<i>I</i> 0505	<i>VI</i> 0506	<i>VI</i> 0507	<i>VI</i> 0508	<i>VI</i> 0509	<i>IV</i> 0510
06-5083 ("O")						<i>I</i> 0606	<i>III</i> 0607	<i>III</i> 0608	<i>III</i> 0609	<i>III</i> 0610
07-5083 (H32- long)							<i>I</i> 0707	<i>II</i> 0708	<i>VI</i> 0709	<i>VI</i> 0710
08-5083 (H32- trans)								<i>I</i> 0808	<i>VI</i> 0809	<i>VI</i> 0810
09-5083 (H34- long)									<i>I</i> 0909	<i>II</i> 0910
10-5083 (H34- trans)										<i>I</i> 1010

4.13 TIPOS DE CURVAS (FADIGA AXIAL)

A Tabela 24 mostra uma parte das possibilidades de combinações entre as curvas geradas dos ensaios de fadiga axial das ligas AlMg 5083 e 5182, este quadro foi projetado da seguinte forma: cada célula está preenchida com dois números específicos, os números em itálico no canto esquerdo acima definem qual o tipo de curva e para melhor visualização estão evidenciados cada uma com um tipo de preenchimento da célula, o outro número de quatro dígitos representa a combinação entre curvas, onde os dois primeiros dígitos identificam qual é a curva de referência e os outros dois últimos representam a curva que está sendo comparada, exemplos: 0305 indica que estamos comparando a curva 03 (AlMg 5182, “H32”, transversal) com a curva 05 (AlMg 5182, “H34”, transversal) e é uma combinação do tipo VI.

Os tipos de curvas pertencentes à Tabela 24, estão definidos como:

- Tipo I: Curvas - mãe.

São as curvas de fadiga axial, específicas de cada liga com suas respectivas características de têmpera e anisotropia, conforme segue:

- .Curva 02 (0202): AlMg 5182 “H32” long., ver Figura 27;
- .Curva 03 (0303): AlMg 5182 “H32” transv., ver Figura 28;
- .Curva 04 (0404): AlMg 5182 “H34” long., ver Figura 29;
- .Curva 05 (0505): AlMg 5182 “H34” transv., ver Figura 30;
- .Curva 07 (0707): AlMg 5083 “H32” long., ver Figura 32;
- .Curva 08 (0808): AlMg 5083 “H32” transv., ver Figura 33;
- .Curva 09 (0909): AlMg 5083 “H34” long., ver figura 34 e
- .Curva 10 (1010): AlMg 5083 “H34” transv., ver Figura 35.

- Tipo II: Curvas/anisotropia.

São os pares de curvas-mãe que comparam os efeitos da anisotropia de cada liga, conforme Tabela 24, e são as identificadas como: 0203, 0405, 0708 e 0910.

Estes tipos de curvas estão contempladas nas Figuras 40 e 41.



- Tipo III: Curvas/têmperas.

São os pares de curvas-mãe formadas pela comparação do efeito do grau de encruamento em relação à condição “O” de cada liga, conforme Tabela 24, e são as identificadas como: 0102; 0103, 0104, 0105, 0607, 0608, 0609, e 0610.

Estas curvas associadas às ligas recozidas (01 e 06) estão representadas esquematicamente nas Figuras 26 e 31.

- Tipo IV: Curvas/ligas.

São os pares de curvas-mãe que indicam o efeito dos principais elementos de ligas com relação à solicitação em fadiga axial, conforme Tabela 24, e são identificadas como: 0207, 0308, 0409, e 0510. Estas curvas estão plotadas nas FIGURAS 36, 37, 38 e 39.



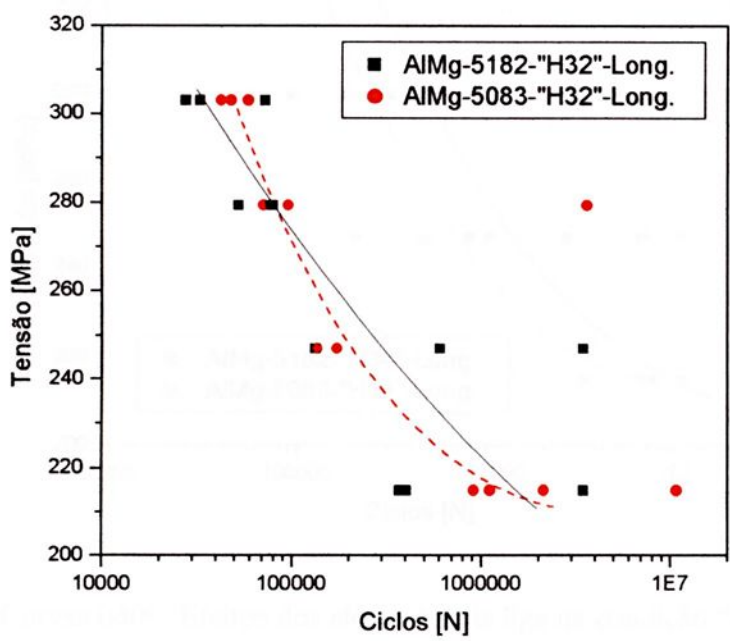


Figura 36 - Curvas 0207: Efeitos dos elementos de liga na condição “H32”, Long.

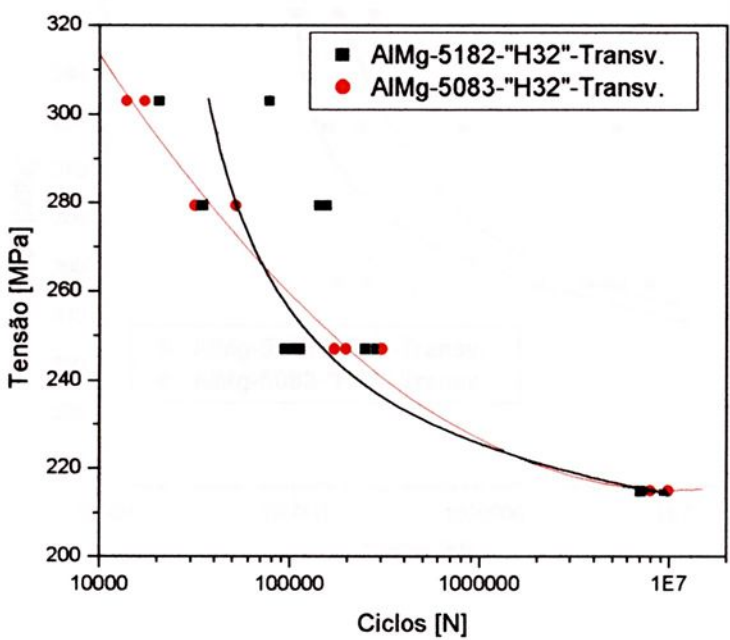


Figura 37 - Curvas 0308: Efeitos dos elementos de liga na condição “H32”, Transv.

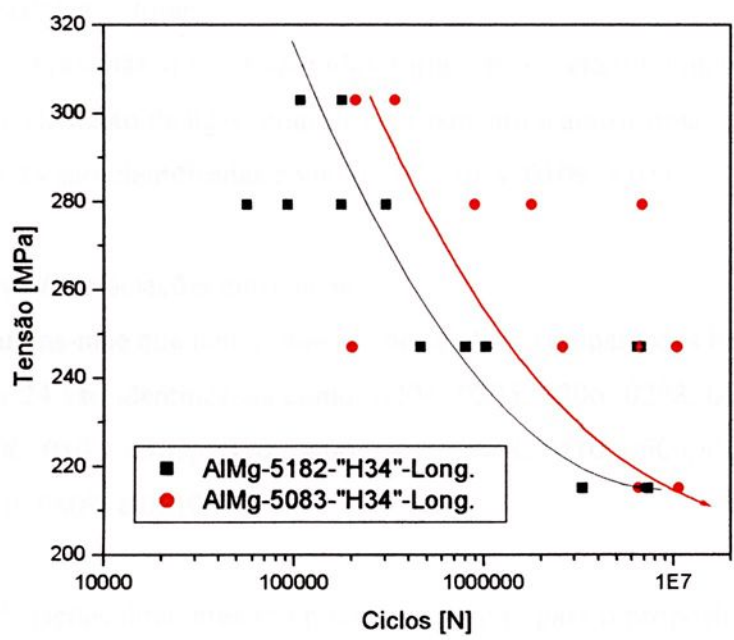


Figura 38 - Curvas 0409: Efeitos dos elementos de liga na condição “H34”, Long.

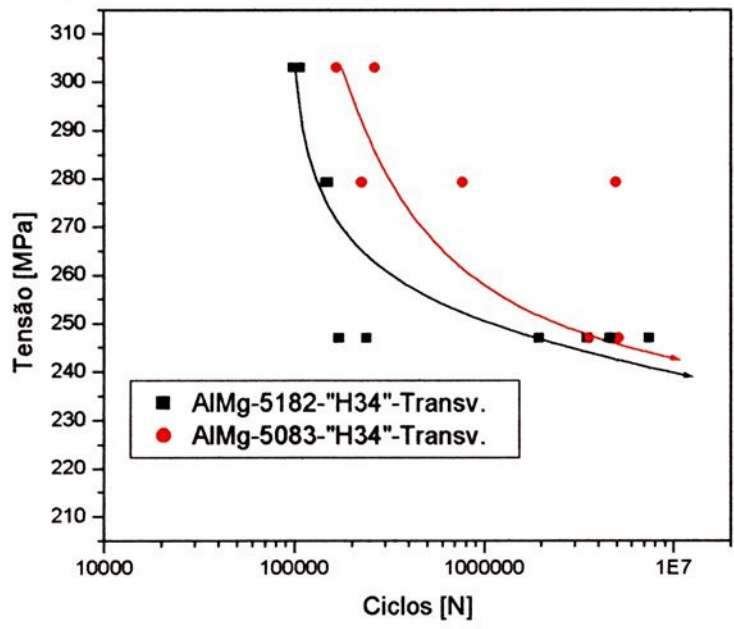


Figura 39 - Curvas 0510: Efeitos dos elementos de liga na condição “H34”, Transv.

- Tipo V: Curvas/efeitos totais.

São pares de curvas-mãe que comparadas fornecem os efeitos combinados devido à porcentagem de elemento de ligas, grau de encruamento e anisotropia.

Na Tabela 24 são identificadas como: 0107, 0108, 0109, e 0110.

- Tipo VI: Curvas/combinações entre ligas.

São pares de curvas-mãe que têm o objetivo de se obter comparações isoladamente.

Na Tabela 24 são identificadas como: 0204, 0205, 0206, 0208, 0209, 0210, 0304, 0305, 0306, 0307, 0309, 0310, 0406, 0407, 0408, 0410, 0506, 0507, 0508, 0509, 0709, 0710, 0809, e 0810.

**** Outras combinações diferentes são possíveis, porém, para o propósito em questão, as mencionadas bastam, porque o quadro montado na Tabela 24 proporcionou uma otimização das combinações permitindo-se concluir as diferenças com um mínimo de tipos de curvas. Para efeito de simplificação as Figuras 40 e 41 fazem comparações dos efeitos causados pelas têmperas e anisotropia da própria liga.**



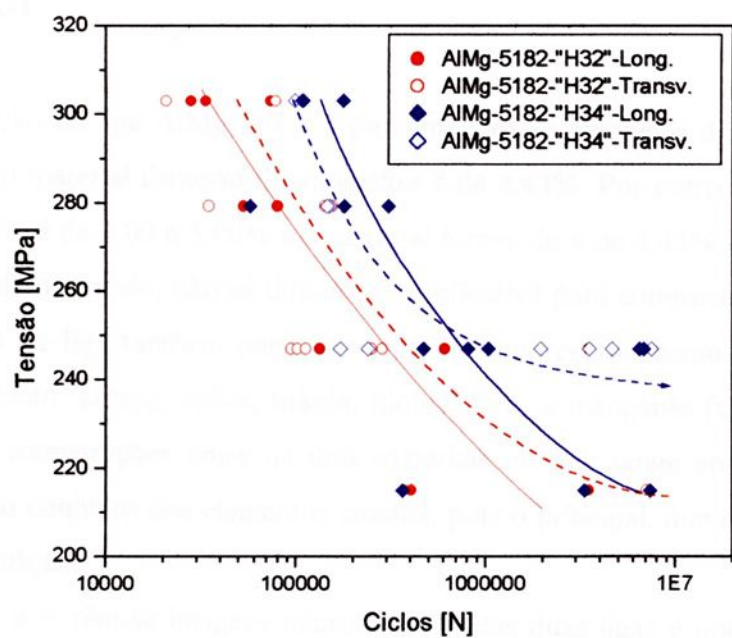


Figura 40 - Curvas 02030405: Efeitos das têmperas e anisotropia na liga AlMg 5182.

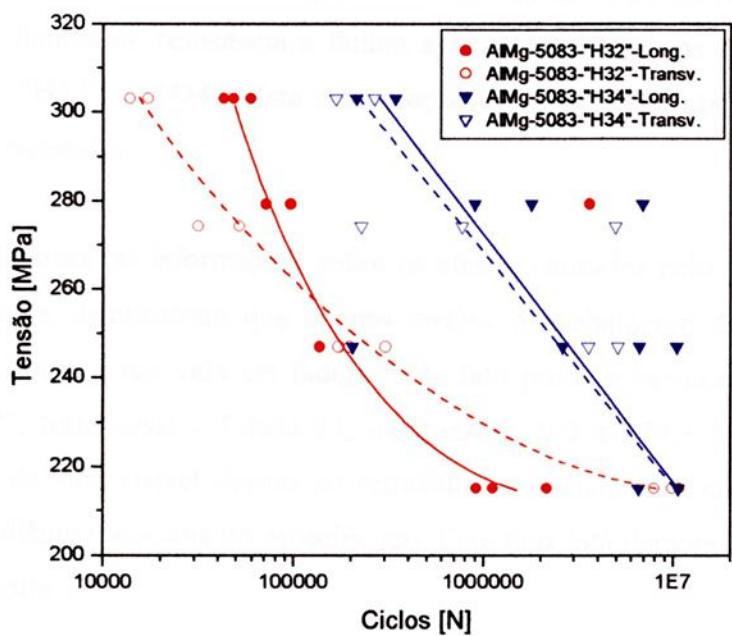


Figura 41 - Curvas 07080910: Efeitos das têmperas e anisotropia na liga AlMg 5083.

4.14 DISCUSSÃO

- Pela especificação da liga AlMg 5083, a porcentagem de magnésio deve estar no intervalo de 4,0 a 4,9% e o material fornecido para análise é de 4,43%. Por outro lado, a especificação da liga AlMg 5182 é de 4,00 a 5,00% e o material fornecido é de 4,45%. Portanto, em termos de porcentagem de magnésio, não há diferença significativa para comparações, por outro lado, outros elementos de liga também importantes diferem percentualmente de forma bem mais expressiva, tais como: cromo, cobre, titânio, níquel, ferro e manganês (ver Tabela 9). Diante deste quadro as comparações entre os dois materiais no que tange aos elementos de liga, corresponderão ao conjunto dos elementos citados, pois o principal, que é o magnésio, não há diferença que justifique.

Nos ANEXOS A e B têm-se imagens microscópicas das duas ligas e pode-se constatar uma diferença na microestrutura entre os dois materiais, provavelmente causada pelo conjunto de elementos de liga citados acima.

- Nos casos das têmperas “O”, nas comparações em termos de resistência a solicitações por fadiga axial das duas ligas, verificou-se que os limites máximos de escoamento destas ligas são inferiores aos limites de resistência à fadiga axial das mesmas nas outras condições de têmperas, ou seja: “H32” e “H34”. Esta constatação descarta a necessidade dos ensaios de fadiga destas ligas recozidas.

- Da revisão de literatura, as informações sobre os efeitos causados pelo tipo de acabamento superficial (Tabela 4), demonstram que quanto melhor o acabamento da superfície de um componente, mais longa é sua vida em fadiga. Este fato pode-se verificar no ensaio da liga AlMg 5083, “H32”, transversal - Tabela 21, nas tensões 303 e 279,3 MPa. Nestes pontos houve uma queda de vida visível devido ao retrabalho executado nos corpos-de-prova que estavam com seus diâmetros acima do especificado. Este fato está demonstrado nas curvas de comparações da Figura 37.



5. CONCLUSÕES.

- 1- A liga AlMg 5083 tem maior resistência mecânica em solicitações estáticas e menor grau de deformação em relação à liga AlMg 5182 e isto se repete nas solicitações de fadiga axial. Estas constatações vêm das análises das curvas comparativas com ênfase nos elementos de liga (Figuras 36, 37, 38 e 39) e das imagens dos ANEXOS A e B:
 - Analisando-se as Figuras 36 e 37, verifica-se que as duas ligas nas condições H32 longitudinais e transversais se sobrepõem, indicando o mesmo comportamento em fadiga axial. Porém, quando se trata das têmperas H34 (Figuras 38 e 39) fica evidente a superioridade da liga 5083 em relação a 5182 nos dois casos de anisotropia: longitudinal e transversal.
 - Comparando-se os ANEXOS A e B, constata-se nas imagens centrais que a liga 5182 tem os grãos bem mais alongados que a liga 5083, demonstrando com isso que a liga 5182 é mais deformável que a 5083.
- 2- Não se pode afirmar nesta pesquisa qual o efeito isolado causado pela diferença percentual de magnésio nas ligas de alumínio-magnésio, isto se deve as amostras estarem praticamente com a mesma porcentagem deste elemento de liga. Porém os elementos secundários que estão com percentuais diferenciados como: cromo, cobre, titânio, níquel, ferro e manganês (ver Tabela 9) alteram o comportamento em fadiga axial, nos casos das têmperas H34, onde fica demonstrada uma ligeira superioridade da liga 5083 em relação a 5182, conforme análises das Figuras 38 e 39.
- 3- Quanto maior o grau de deformação fica mais evidenciado que a vida em fadiga axial da liga AlMg 5083 é maior do que a liga AlMg 5182, com a mesma porcentagem de magnésio. Nas curvas comparativas em que se têm as têmperas “H32” (Figuras 36 e 37) há um confundimento entre os comportamentos, porém, quando se observam as curvas comparativas das têmperas “H34” (Figuras 38 e 39), fica evidente que a liga 5083 é superior a 5182. Analisando as Figuras 40 e 41 verifica-se que o grau de deformação é a variável mais significativa na vida em fadiga axial, quando se compara as situações “H32” com as “H34” e a liga AlMg 5083 o ganho é maior.



- 4- Para comparar as duas ligas em termos de aplicação industrial o tipo de processo de fabricação do produto feito com estas ligas é fundamental. Nos casos em que o fabricante define a liga 5182 na condição de têmpera “H32” e o item não tem nenhuma conformação não há perda nem ganho em termos de fadiga. Neste caso o fator determinante é o custo de cada liga. Porém, se houver conformação há um ganho em termos de alongamento, conforme demonstrado nos ANEXOS A e B, onde a liga 5182 é mais deformável que a 5083. Quando a liga dimensionada é de têmpera “H34”, a liga AlMg 5083 é superior a AlMg 5182 em termos de vida em fadiga conforme demonstrado nas Figuras 38 e 39.
- 5- Observando as imagens microscópicas das duas ligas nas condições de têmpera “H32” e “H34”, verificam-se nas regiões de fratura, uma parte das superfícies lisa e outra parte irregular rugosa, características de rompimentos por fadiga e por tração respectivamente. Destas imagens podemos confirmar que os ensaios executados induziram nos corpos-de-prova falhas por fadiga axial, como se esperava. Estas imagens estão nos APÊNDICES C, D, E, F, G, H, I e J.
- 6- Não se pode afirmar que haja perda ou ganho em termos de fadiga axial quando se trata da orientação dos grãos das duas ligas em estudo. Na análise das Figuras 40 e 41, há uma inversão na posição das curvas no sentido horizontal e vertical de laminação para as duas condições de têmperas: “H32” e “H34” o que não permite afirmar que esta variável é significativa em termos de fadiga axial.
- 7- Para os casos de comparação entre as duas ligas de alumínio magnésio 5083 e 5182 com os mesmos percentuais de magnésio do ponto de vista do fabricante houve um acerto na decisão de optar somente pela liga 5182, pois o ganho em custos operacionais é significativo. Pelo lado do cliente externo, o ganho só será significativo se o custo for menor do que o da liga 5083, pois quando se trata das têmperas “H34” a 5083 é um pouco superior em relação a 5182.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

1- Comparar as ligas de alumínio-magnésio AlMg 5083 e AlMg 5182, com diferença significativa da porcentagem de magnésio (por exemplo 4,0% na liga 5083 e 5,0% na 5182), em ensaios de fadiga sob solicitação em flexão rotativa, aplicando a estatística de experimentos com modelos de Tagushi. Estudar o comportamento das trincas através de microscopia eletrônica, seu início, crescimento e o rompimento do componente.

2- Comparar as ligas de alumínio-magnésio AlMg 5083 e AlMg 5182 (com diferença da porcentagem de magnésio), em ensaios de fadiga sob solicitação em flexão alternada, aplicando a estatística de experimentos com modelos de Tagushi. Estudar o comportamento das trincas através de microscopia eletrônica, seu início, crescimento e o rompimento do componente.

3- Pesquisar a liga AlMg 5182 (com a porcentagem de magnésio no mínimo e no máximo), quanto a solicitações em fadiga do tipo corrosão sob tensão, especificamente a tampa das latas de cerveja, onde hoje apresentam falhas quando este tipo de embalagem está sob variações consideráveis de temperatura, que por fadiga se rompem. Este fenômeno acontece quando há um aumento significativo de temperatura no ambiente (geralmente nas regiões do nordeste brasileiro), o líquido e os gases aprisionados aumentam de volume e pressão provocando uma deformação na tampa da embalagem que é feita de AlMg 5182. Esta deformação traciona a superfície externa da tampa e comprime a interna, e quando cai a temperatura a tampa volta a sua posição de descanso, portanto o aquecimento e o resfriamento provocam esforços cíclicos resultando no rompimento da tampa da embalagem do produto por fadiga.

4- As ligas de Alumínio magnésio são largamente empregadas devido a suas características como: Custo moderado, boa resistência mecânica e a corrosão.

Um dos campos de aplicação é o de peças conformadas e em alguns casos ocorrem estrias características das ligas de Alumínio-magnésio o que leva a uma não conformidade do item produzido. Estudar as causas destas estrias teria uma grande contribuição no conhecimento destas ligas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ALCAN, Alcan Alumínio do Brasil Ltda., Chapas Alcan-Catálogo.
- ASM, American Society for Metals, Atlas of Fatigue Curve, Metals Park, Ohio, OH 44073, 1986.
- ASTM, American Society American Society for Testing and Materials. Standard practice for conducting constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials, E 466 - 82.
- BARILE, N.V., Curso de Princípios de Metalurgia, Alcan Alumínio do Brasil Ltda.
- BARTER, S. A., CLAYTON, J. Q., Aspects of Fatigue, Vol. 15, nº 4, pp. 325-332, 1993.
- BLASTIBRÁS, Tratamento de Metais Ltda., Catálogo Técnico, São Paulo/SP, Brasil.
- BRYANT, A. S., Metallurgical Factors Affecting the Control of Mechanical Properties in High-Strength, Aluminum Alloys, Proc. Simp. Alloys in the Aircraft Industries, Turin, pp. 45, 1976.
- DIETER, G.E., Metalurgia Mecânica, 2ª ed., Editora Guanabara Koogan, Rio de Janeiro/RJ, 1981.
- FINE, M. E., Fatigue Resistance Of Metals, Metallurgical Transactions, Vol. 11A, p. 365-379, march, 1980
- GORANSON, U. G., Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Fatigue issues in Aircraft Maintenance and Repairs, Int. J. Fatigue, Vol. 19, Supp. nº1, pp. S3 - S21, 1997.

- MATSUMOTO, Y., MAGDA, D., HOEPPNER, D. W., KIM, T. Y., Effect of Machining Processes on the Fatigue Strength of Hardened AISI 4340 Steel, Transactions of the ASME, v. 113, May 1991.
- MEYERS, M., A., Princípios de Metalurgia Mecânica, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo/SP, 1982.
- METAL IMPROVEMENT COMPANY, INC., M. I. C., Shot Peening Applications, Technical booklet, 7ª edition.
- MILLER, K. J., Materials Science Perspective of Metal Fatigue Resistance, Materials Science and Technology, Vol. 9, pp. 453 - 462, 1993.
- NASCIMENTO, M., P., Determinação da Vida em Fadiga do Aço ABNT 4340 Revestido com Cromo Duro Sobre Níquel Químico, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, FEG/UNESP, Guaratinguetá, 1999.
- OKAMOTO, A., NAKAMURA, H., The influence of Residual Stress on Fatigue Cracking, Journal of Pressure Vessel Technology, v. 112, p 199-203, 1990.
- PEREIRA, C. P. M., Fadiga na liga Al 7475 - T 761. Lorena, 1996 - Tese Doutorado - Faculdade de Engenharia Química de Lorena.
- SANCTIS, M. and LAZZERI. L., Na Evaluation of Fatigue and Fracture Mechanics Properties of Ultra-High Strength 7XXX Series Al-Alloys, Fatigue Fract. Engng. Struct., Vol. 15, nº 3, pp. 249-263, 1992.
- SCHIJVE, J., a Normal Distribution or a Weibull Distribution for Fatigue Lives, Fatigue Fract. Engng. Mater Struct., Vol. 16, pp. 851 - 859, 1993.
- STARKE, E. A. Jr., STALEY, J.T., Application of Modern Aluminum Alloys to Aircraft, in Progress Aerospace Sciences, vol.32, pp. 131 a 172, 1996.

- TORIBIO, J., Residual Stress Effects in Stress-Corrosion Cracking, *Journal of Material Engineering and Performance*, v. 7(2), p. 173-182, 1997.
- TURNBULL, A., DE LOS RIOS, E.R., The Effect of Grain Size on the Fatigue of Commercially Pure Aluminium, *Fadigue Frat. Engng. Mater. Struct.*, vol. 18, nº 12, pp. 1467-1467, 1995.
- VASCONCELOS, S. M. B., Estudo da influência dos tratamentos superficiais de cromo duro e níquel químico na vida em fadiga do aço de alta resistência, ABNT 4340, Trabalho final de graduação, Escola de Engenharia Industrial, E. E. I., São José dos Campos/SP, 1992.
- VOORWALD, H. J. C. e PASTOUKHOV, V. A., Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural, pp. 114 - 144, 1995.
- VOORWALD, H. J. C., Analyses on influence of some variables on rotative bending fatigue testing behaviour in AISI 4140 and 4340 steels, PhD Thesis, Aeronautic Technologic Institute - I. T. A., São Paulo, Brazil.



APÊNDICES



APÊNDICE A

CURVAS DE ENSAIOS DE TRACÇÃO, "0".

cond. "0"
cdp. "B" - LIGA AlMg 5083 - TRANSV

cond. "0"
cdp. "C" - LIGA AlMg 5083 - LONG

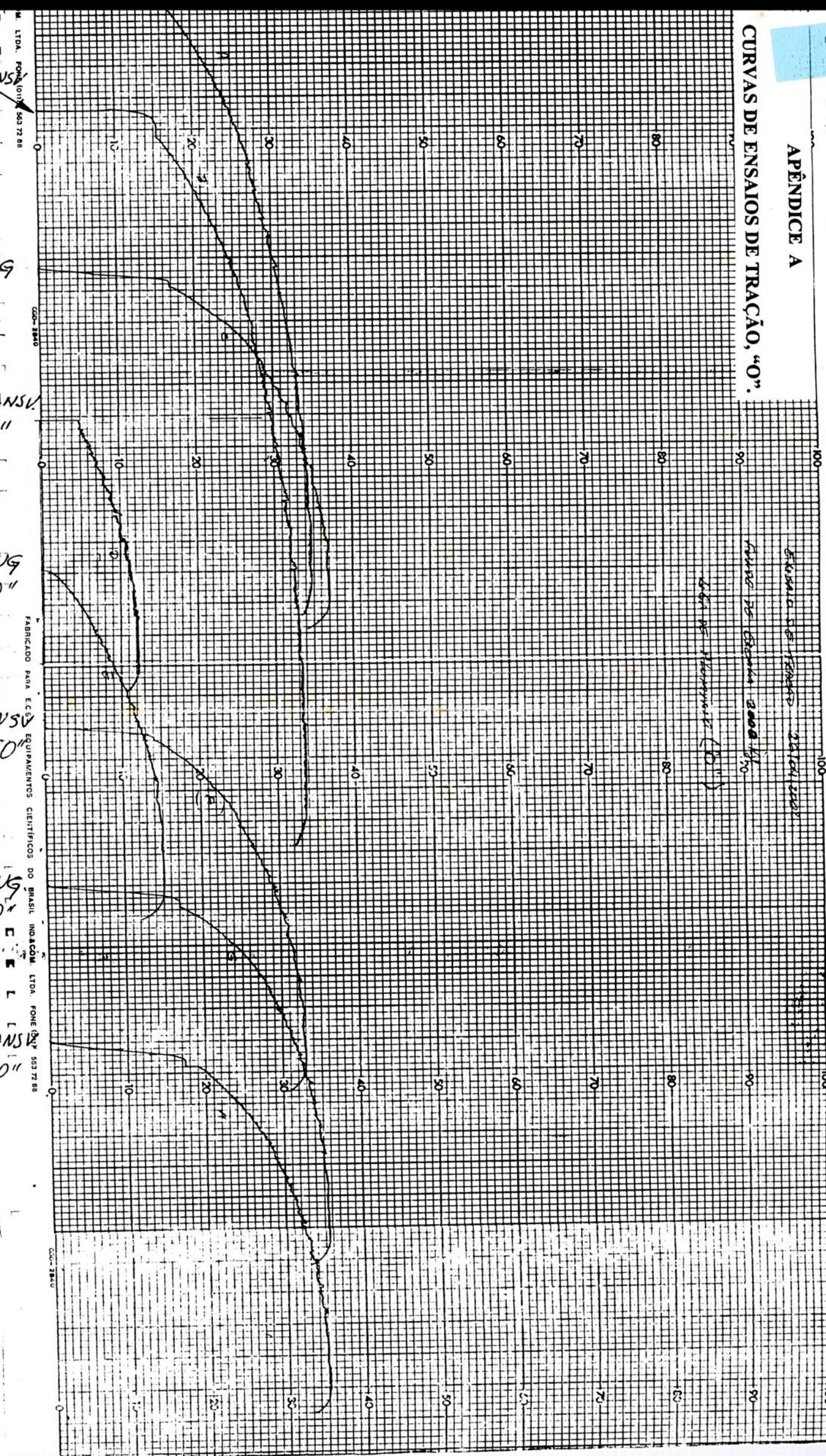
cond. "0"
cdp. "D" - LIGA AlMg 5083 - TRANSV

cond. "0"
cdp. "E" - LIGA AlMg 5182 - LONG

cond. "0"
cdp. "F" - LIGA AlMg 5182 - TRANSV

cond. "0"
cdp. "G" - LIGA AlMg 5182 - LONG

cond. "0"
cdp. "H" - LIGA AlMg 5182 - TRANSV



APÊNDICE B

ENSaios DE TRACÃO, "H32" E "H34".

EXEMPLO DE TRACAO 1000000

EXEMPLO DE TRACAO 2000000

EXEMPLO DE TRACAO 3000000

cdp "B": LIGA AlMg 5083 "H32"
TRANSV.

cdp "C": LIGA AlMg 5083 "H34"
LONG.

cdp "D": LIGA AlMg 5083 "H34"
TRANSV.

cdp "E": LIGA AlMg 5182 "H32"
LONG.

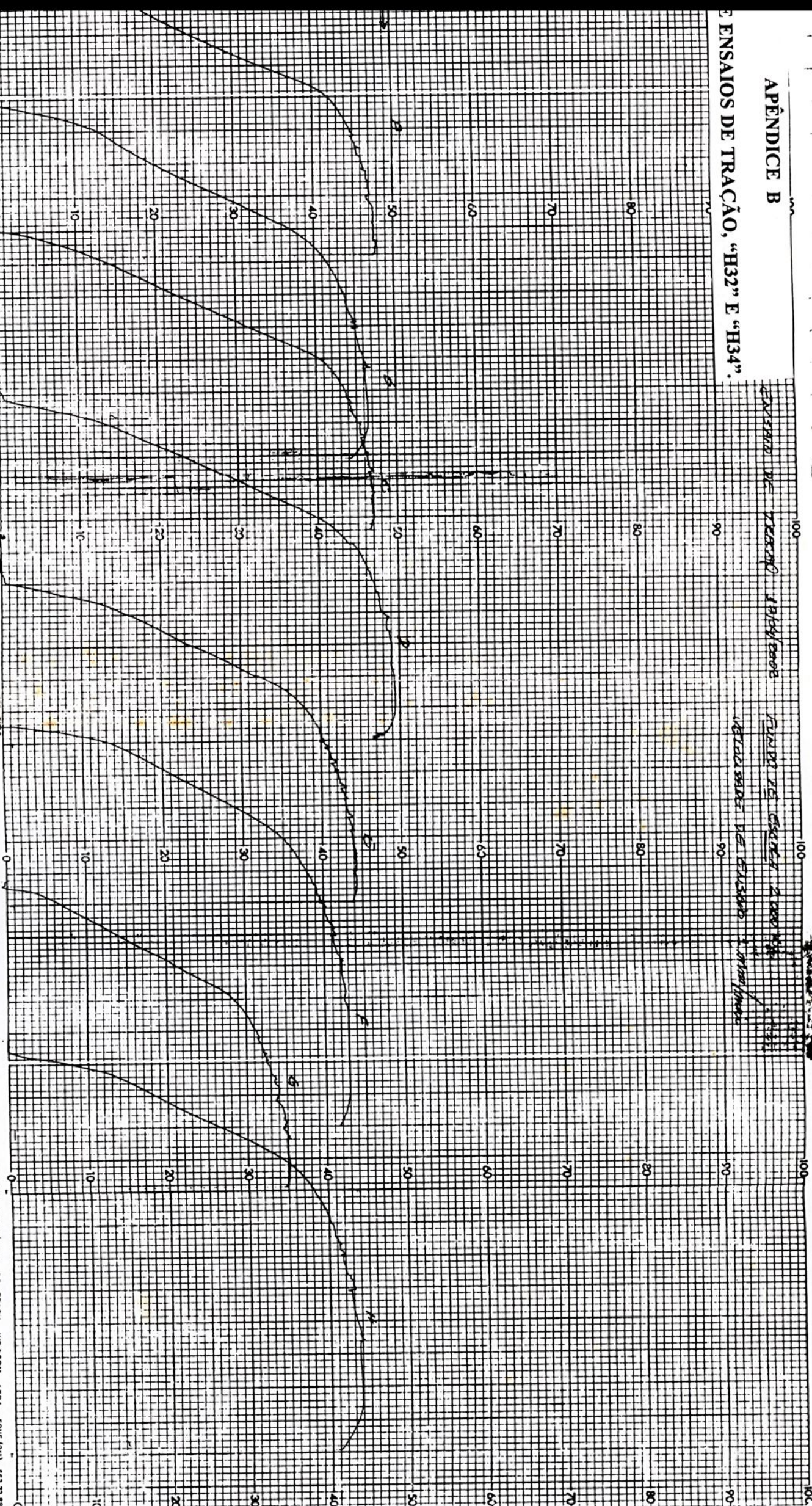
cdp "F": LIGA AlMg 5182 "H32"
TRANSV.

cdp "G": LIGA AlMg 5182 "H34"
LONG.

cdp "H": LIGA AlMg 5182 "H34"
TRANSV.

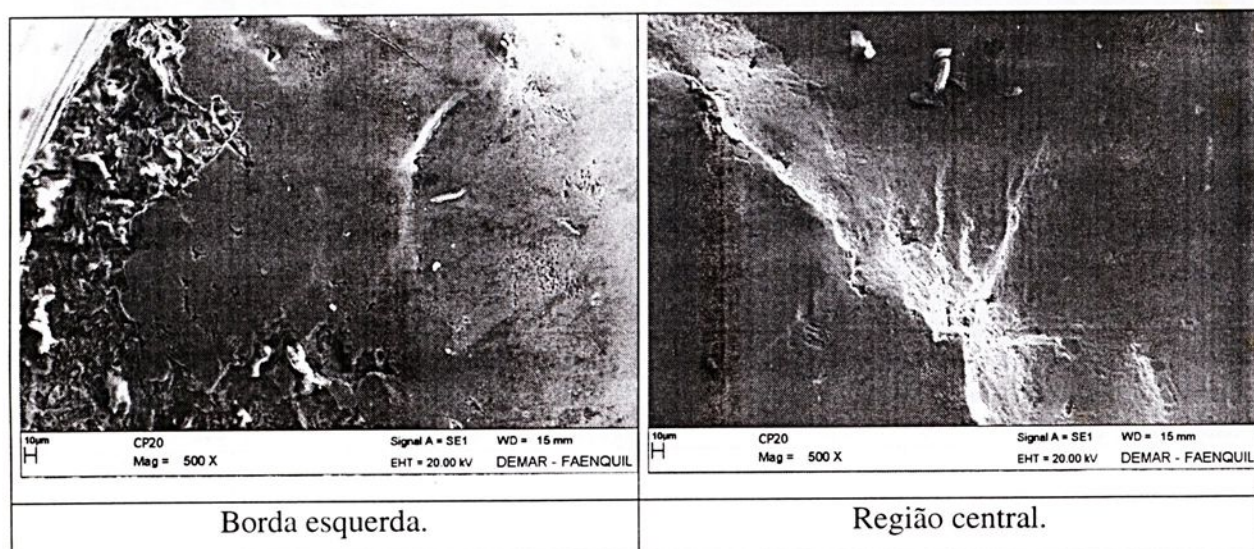
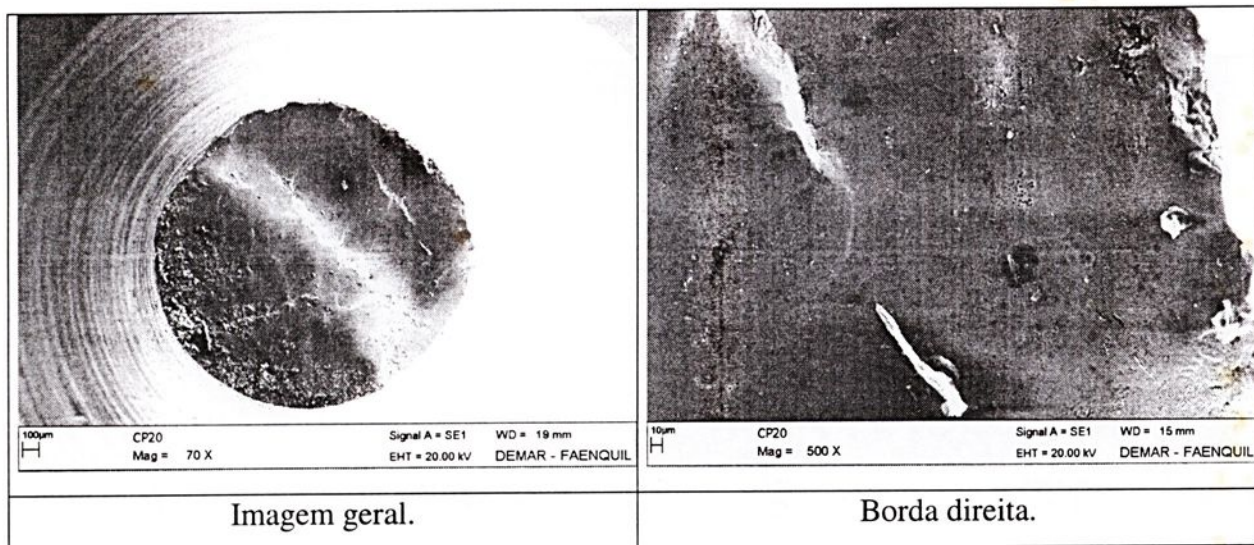
FABRICADO PARA E.C.B. - EQUIPAMENTOS CIENTIFICOS DO BRASIL IND.COM. LTDA. FONE (011) 563 72 88

FABRICADO PARA E.C.B. - EQUIPAMENTOS CIENTIFICOS DO BRASIL IND.COM. LTDA. FONE (011) 563 72 88



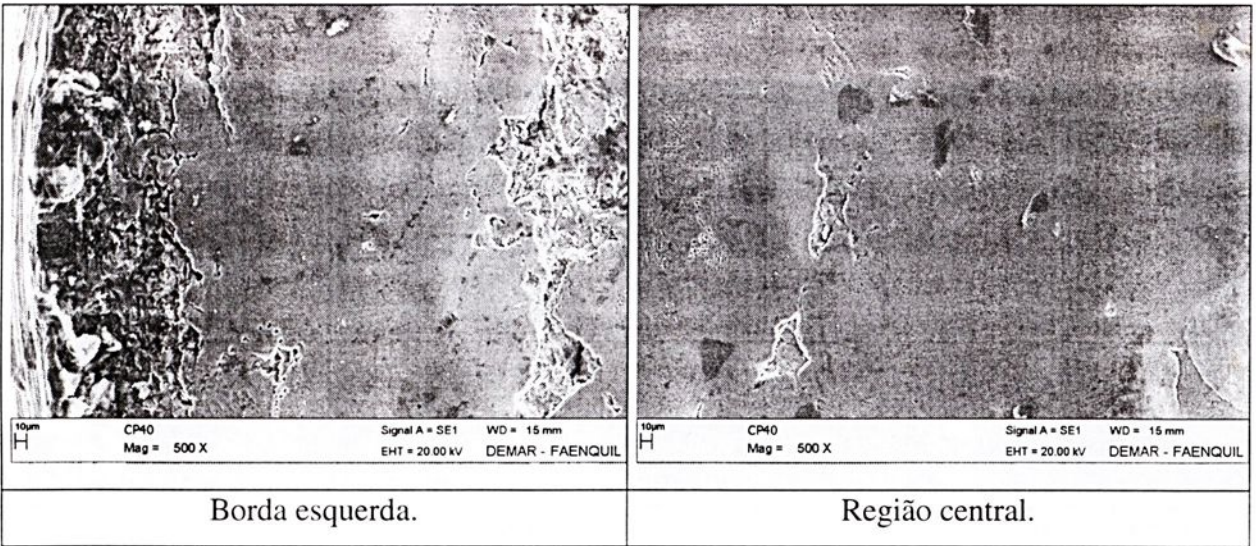
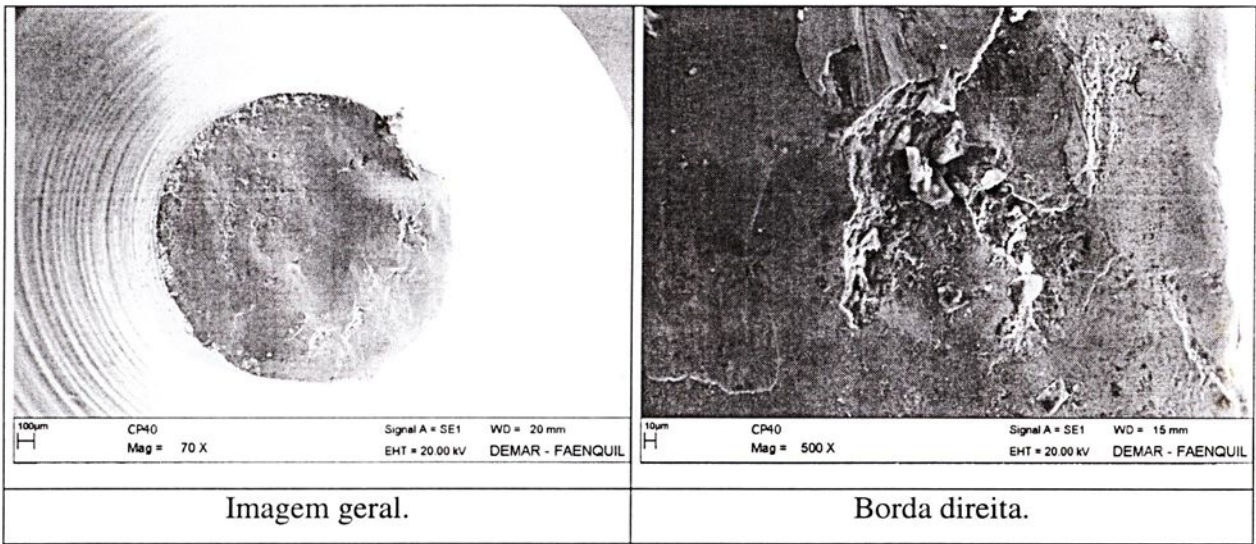
APÊNDICE C

Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.) da superfície de fratura do CDP-20,
liga AlMg 5182, "H32", Longitudinal.



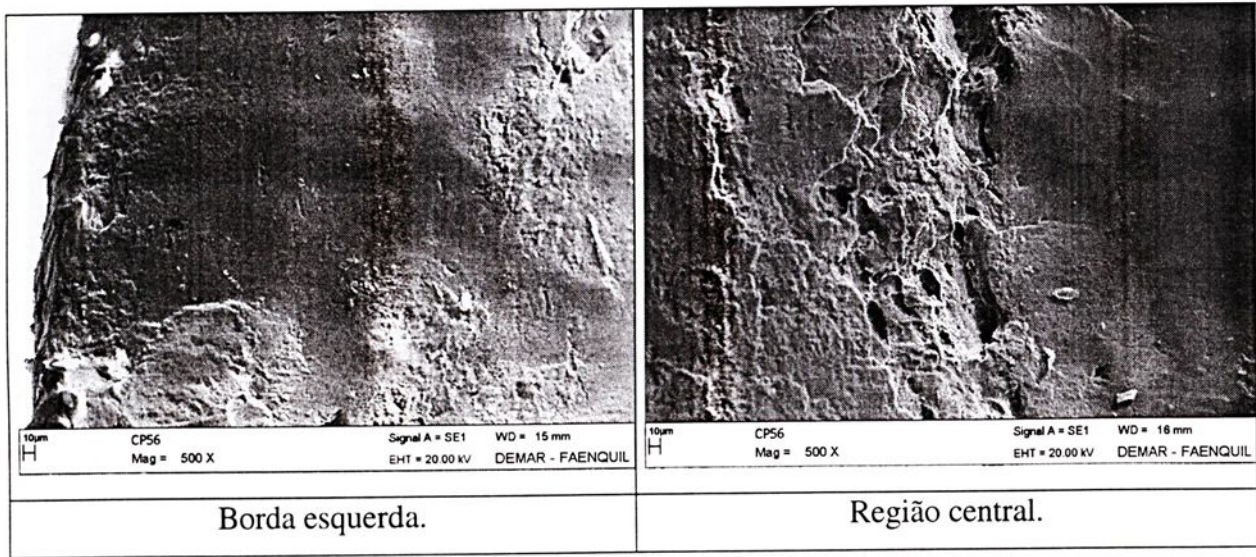
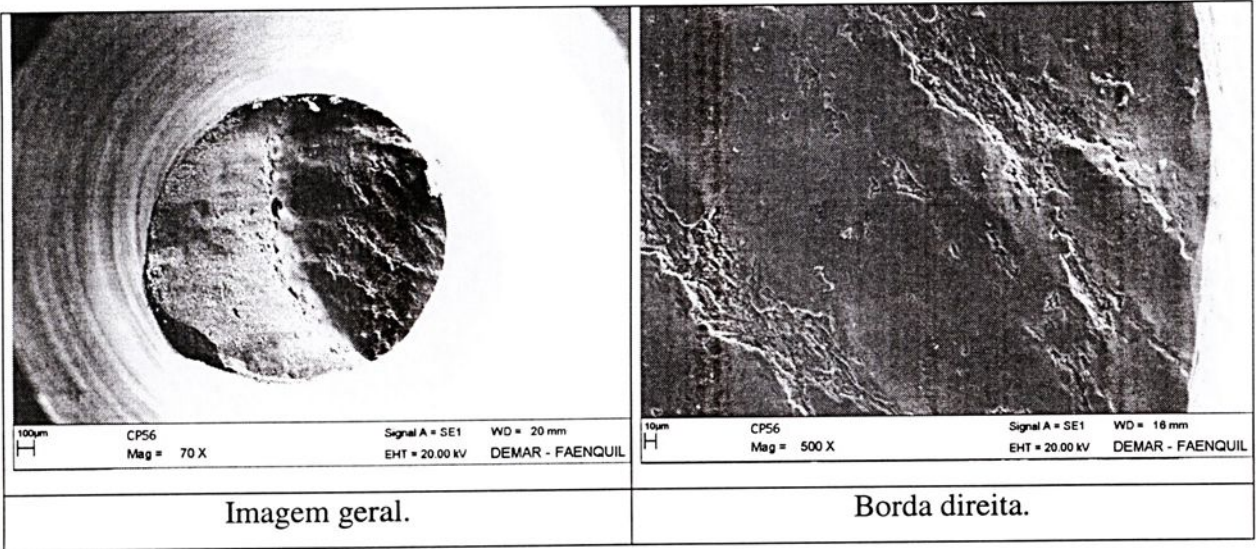
APÊNDICE D

Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.) da superfície de fratura do CDP-40,
liga AlMg 5182, “H32”, Transversal.



APÊNDICE E

Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.) da superfície de fratura do CDP-56, liga AlMg 5182, “H34”, Longitudinal.



APÊNDICE F

Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.) da superfície de fratura do CDP-77,
liga AlMg 5182, “H34”, Transversal.

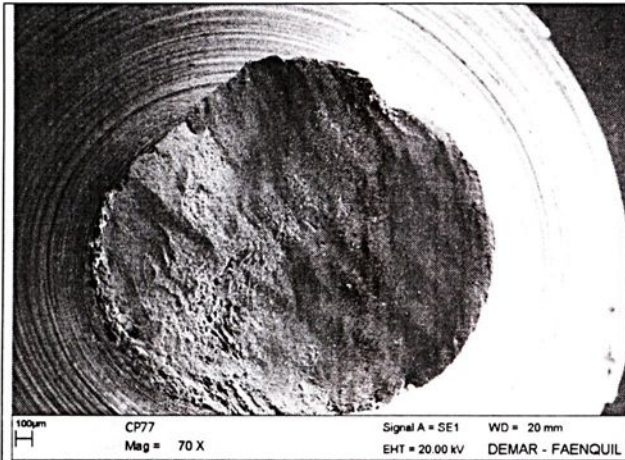
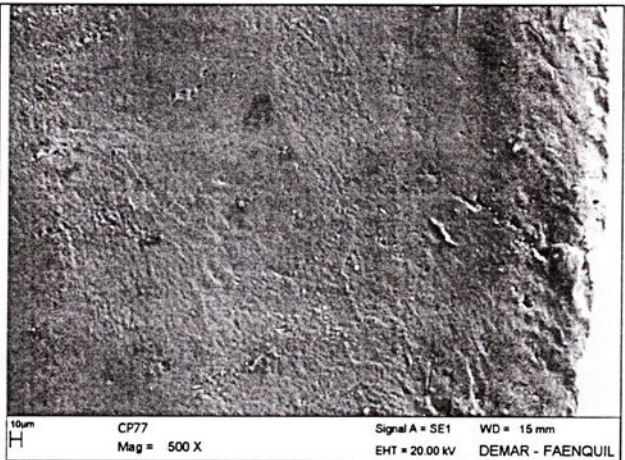
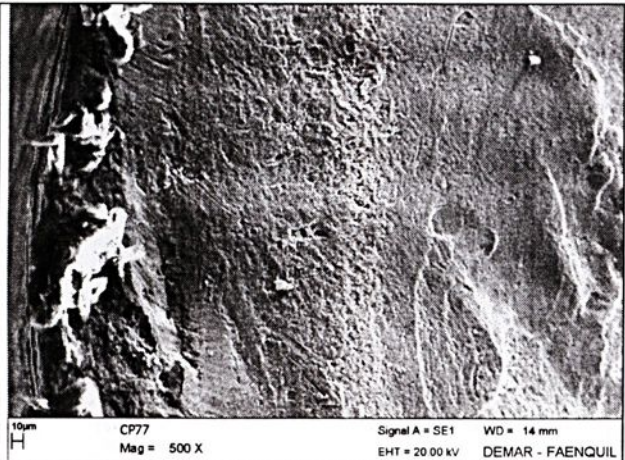


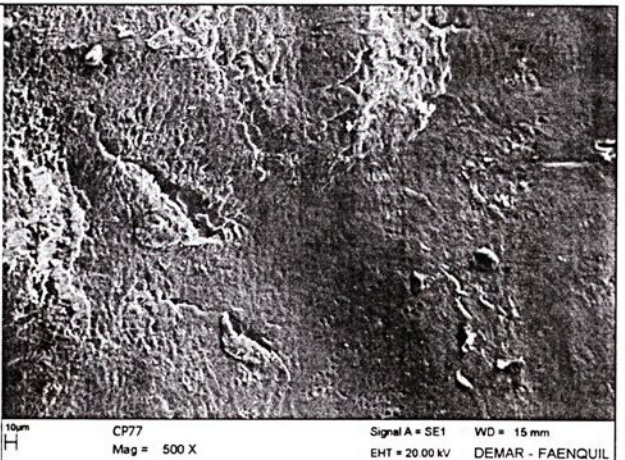
Imagem geral.



Borda direita.



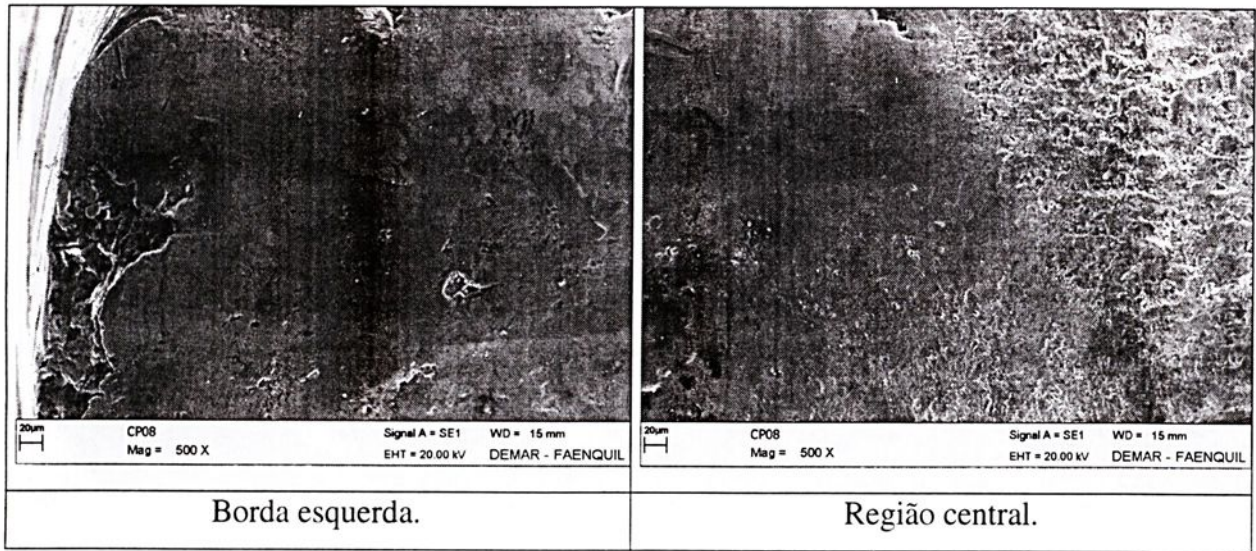
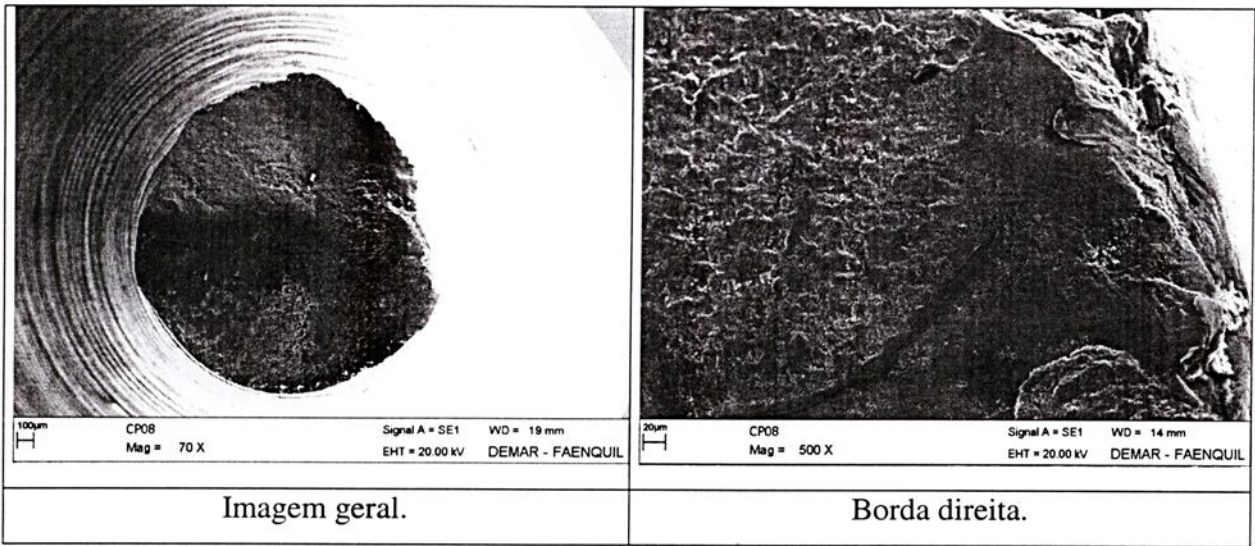
Borda esquerda.



Região central.

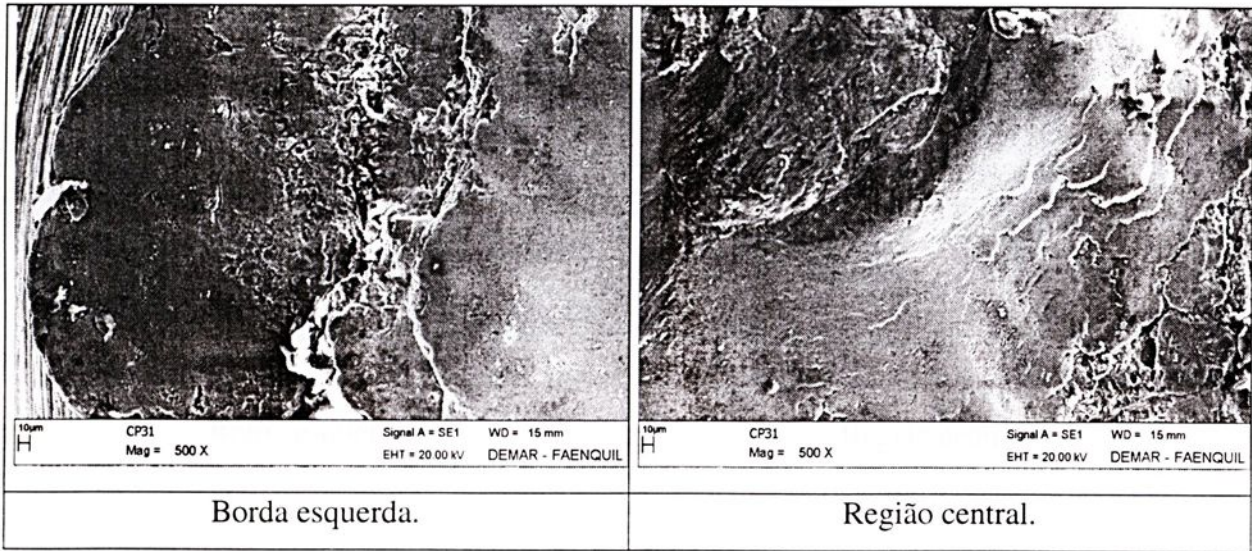
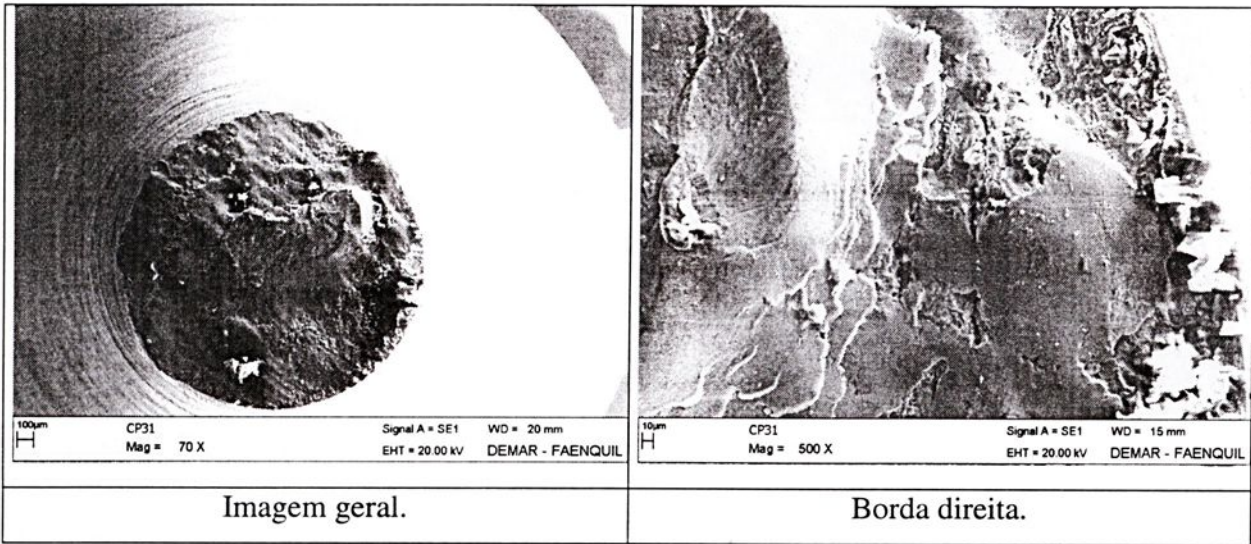
APÊNDICE G

Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.) da superfície de fratura do CDP-08, liga AlMg 5083, “H32”, Longitudinal.



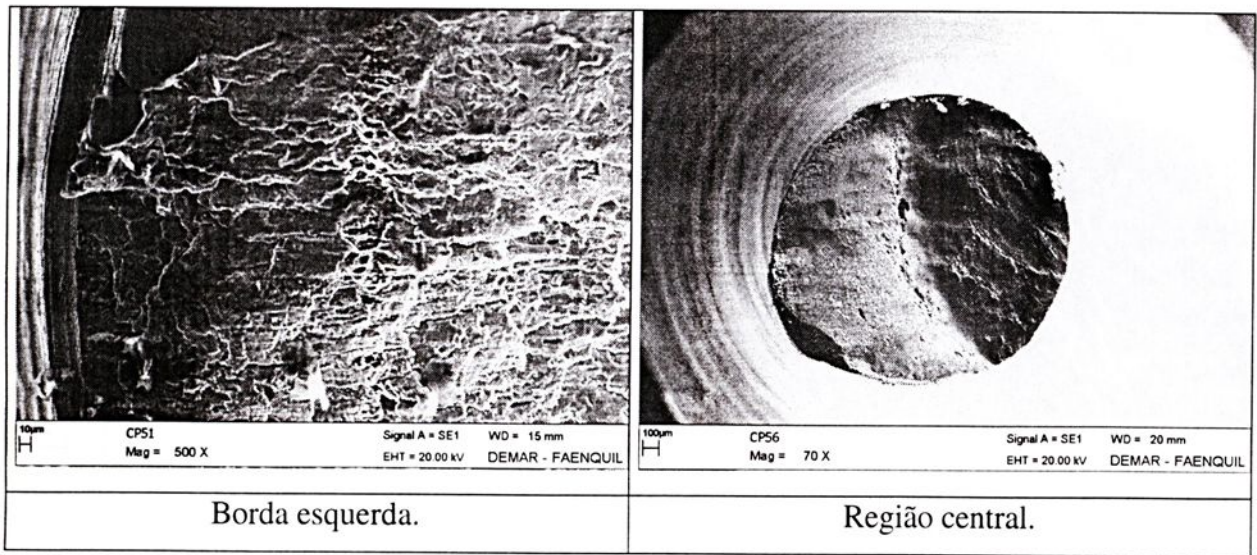
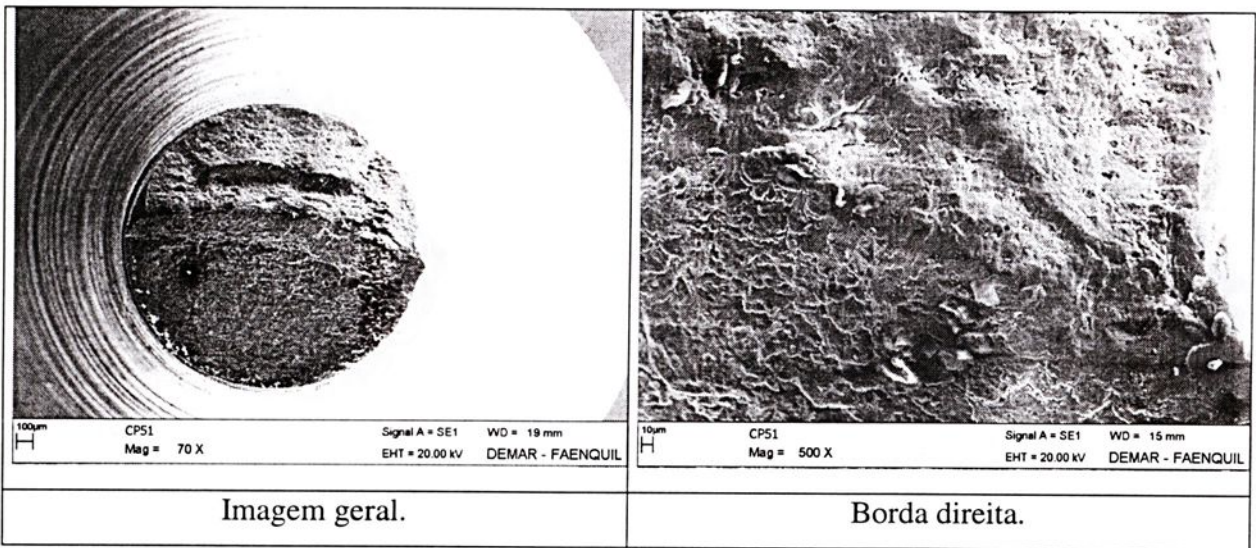
APÊNDICE H

Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.) da superfície de fratura do CDP-31, liga AlMg 5083, “H32”, Transversal.



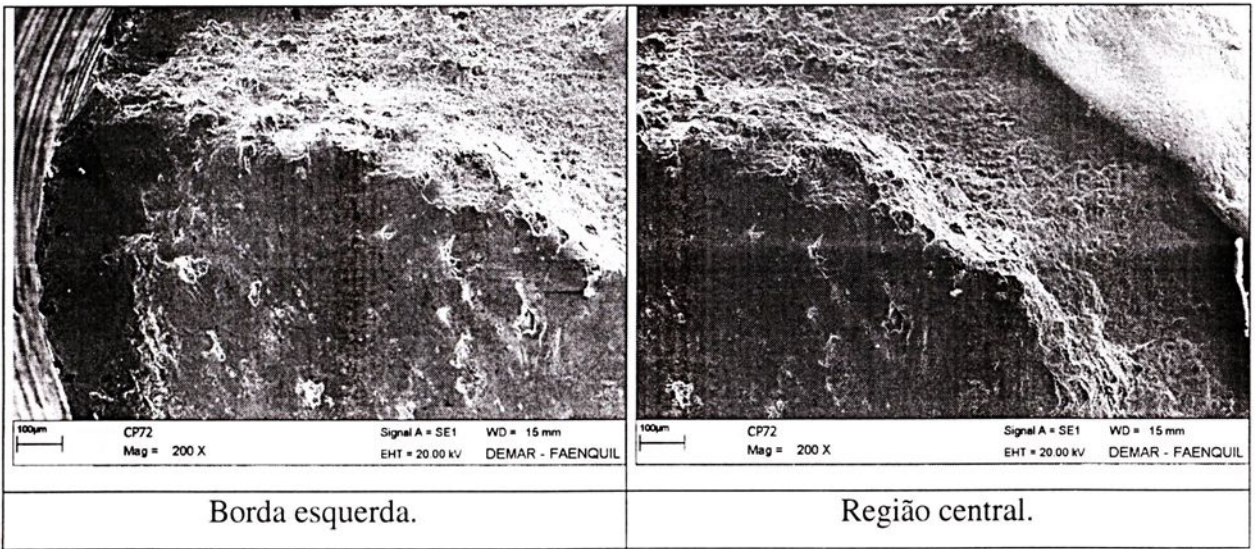
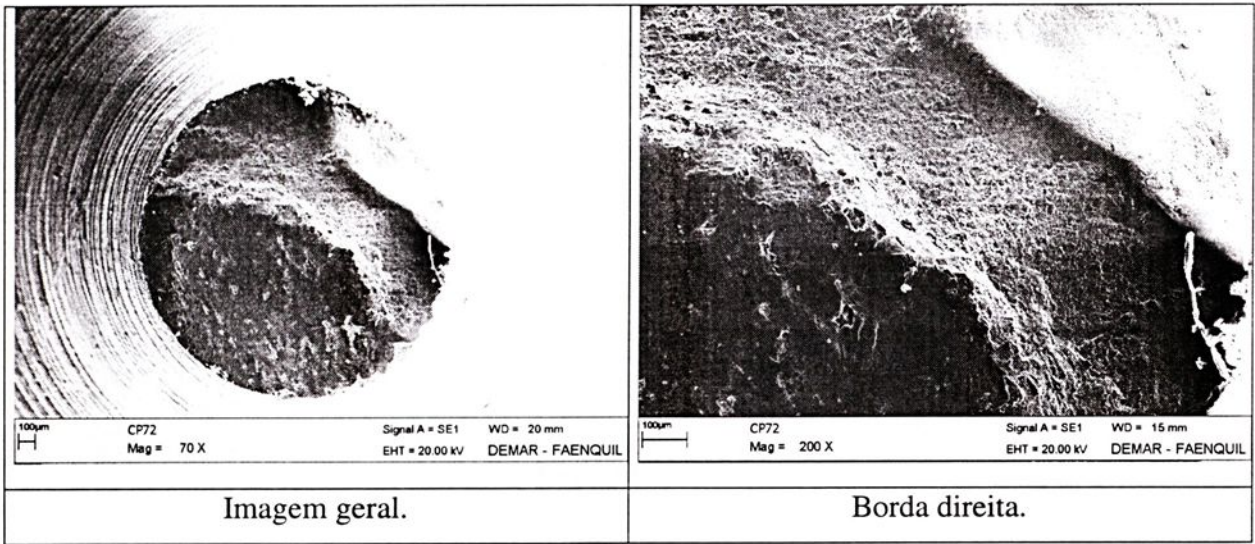
APÊNDICE I

Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.) da superfície de fratura do CDP-51, liga AlMg 5083, “H34”, Longitudinal.



APÊNDICE J

Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.) da superfície de fratura do CDP-72,
liga AlMg 5083, “H34”, Transversal.



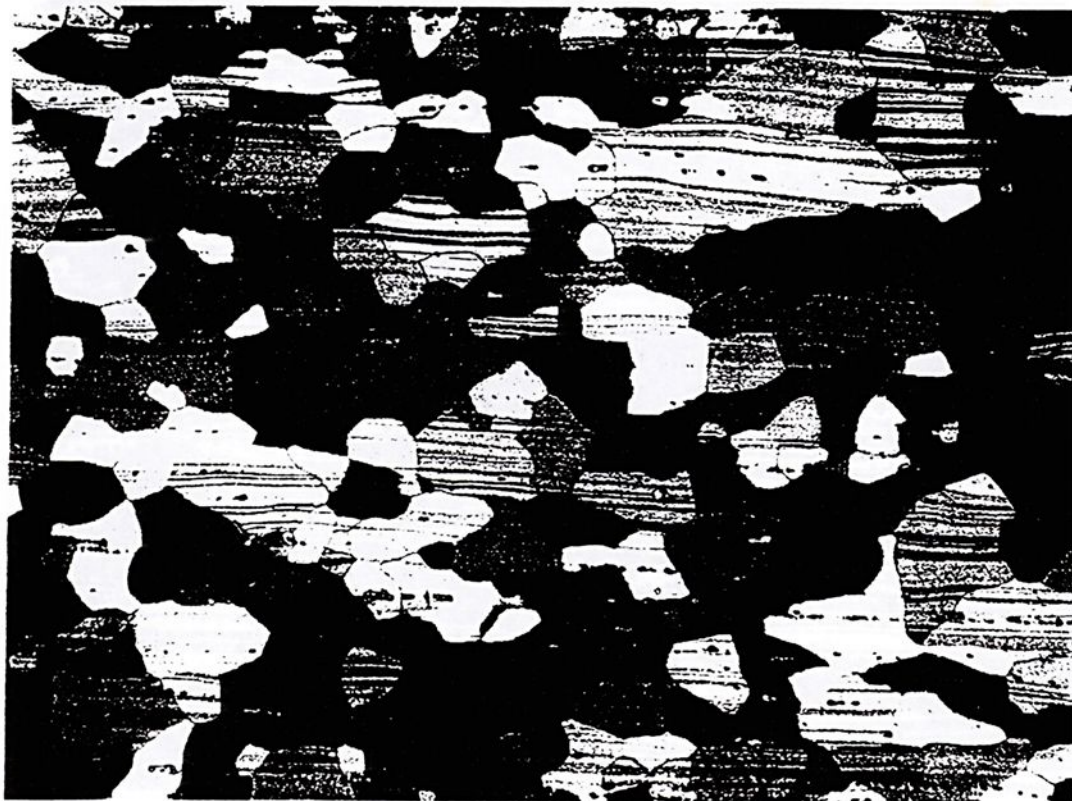
ANEXOS

ANEXO A

SUPERFICIE, T.G = 5,0 ASTM, aumento = 100X LIGA 5083

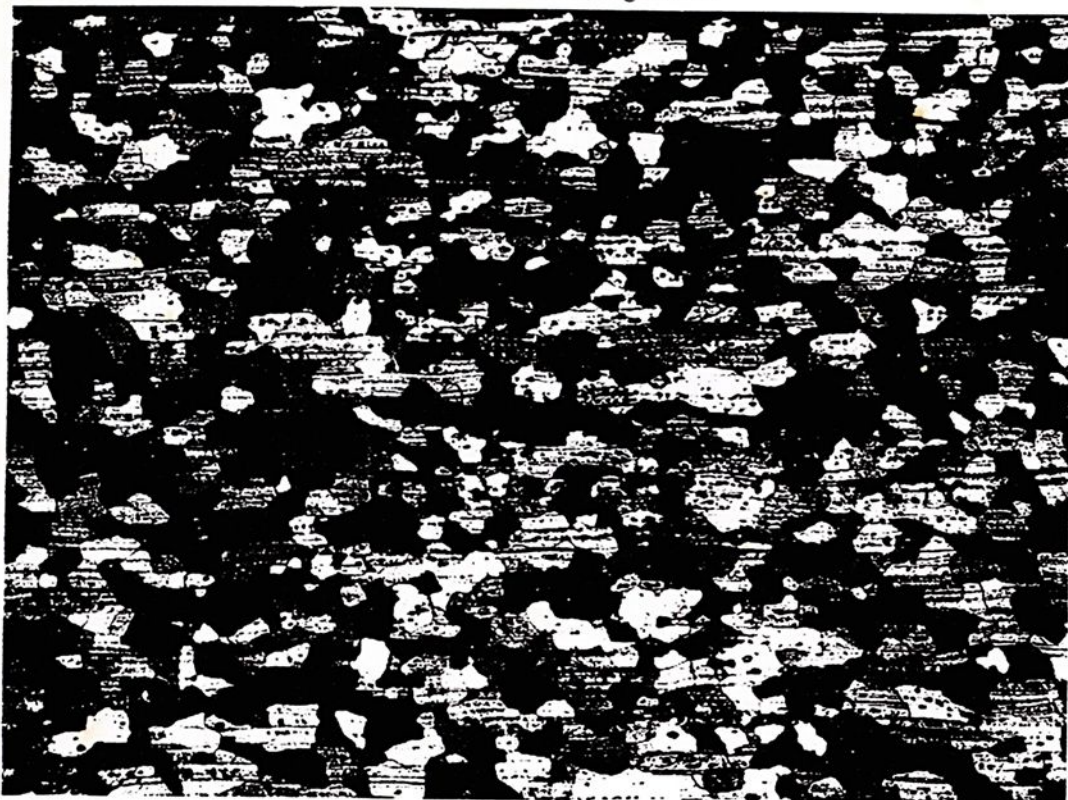


CENTRO, T.G = 4,5 ASTM.



ANEXO B

Superfície da chapa. T.G = 6,0 ASTM, aumento = 100X , Liga 5182.



CENTRO T.G = 4,5 ASTM



