

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
MESTRADO PROFISSIONAL

JOSÉ DANIEL DE SOUZA MOURA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DO COMPORTAMENTO EM
FADIGA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA413.1 USADA EM RODAS AUTOMOTIVAS**

ITAJUBÁ
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
MESTRADO PROFISSIONAL

JOSÉ DANIEL DE SOUZA MOURA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DO COMPORTAMENTO EM
FADIGA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA413.1 USADA EM RODAS AUTOMOTIVAS**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Mestrado Profissional da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Ricardo Risso Chaves

Co-orientador: Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro

ITAJUBÁ
2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde, sabedoria e por permitir esta conquista.

Agradeço especialmente à minha esposa e aos meus filhos pelo apoio e incentivo neste período.

Aos professores Dr. Ricardo Risso Chaves, Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro e Dra. Mirian de Lourdes N. Motta Melo pela disponibilidade, paciência e ensinamentos.

A todos os colegas de trabalho pelo apoio e ensinamentos para idealização deste trabalho.

Por fim, à empresa Mangels Rodas S.A, pela doação dos corpos de prova para estudo, apoio e liberação para a realização do trabalho.

RESUMO

Atualmente, um dos principais focos do setor industrial está na redução dos custos de fabricação. A indústria automotiva também busca aperfeiçoar seus projetos para fabricar veículos que apresentem menor consumo de combustível, decorrente da redução de peso e do aumento na eficiência do motor. Estas duas condições são importantes no estabelecimento do diferencial entre empresas concorrentes. Desta forma, a substituição de materiais pesados por outros mais leves, e/ou que apresentem maior facilidade de fabricação, é uma tendência que contribui para atingir este diferencial. As rodas veiculares são indispensáveis à movimentação de um veículo, além de importantes componentes de segurança. No caso das rodas fabricadas a partir de ligas de alumínio, a substituição de uma liga endurecível por tratamentos térmicos por outra, cujas propriedades mecânicas são obtidas diretamente na fundição em molde permanente e baixa pressão, pode representar uma economia significativa na redução do tempo de fabricação e na eliminação de etapas que despendem elevada energia e altos investimentos em equipamentos. Neste trabalho foram avaliadas as propriedades mecânicas da liga de alumínio AA413.1 fundida em molde permanente e vazada em baixa pressão e sua correlação com a estrutura interna. Os corpos de prova para os ensaios de tração e de fadiga por flexão rotativa foram retirados das aletas da roda. O limite de resistência à fadiga para 10^6 ciclos obtido foi 91 MPa, enquanto o nível médio de porosidade foi de 1,2 % e o espaçamento interdendrítico secundário de 33 ± 4 μm . O alongamento obtido foi de $3,64 \pm 0,14$ %, e os limites de escoamento e de resistência à tração ficaram, respectivamente, em 80 ± 4 MPa e 165 ± 5 MPa.

Palavras-chave: Roda automotiva; Fadiga; Flexão rotativa; Ligas de alumínio.

ABSTRACT

Currently, industries are focused on the reduction of manufacturing costs. The automotive sector is also making efforts to produce vehicles with lower fuel consumption due to a lower weight and higher motor's efficiency. These two conditions are very important in differentiating concurrent companies. Thus, the change of heavy materials for lighter ones, and/or for those which have easier manufacturing, is a trend that contributes to achieve these differentials. The wheels are essential components to the vehicle's movement and play a safety role, as well. In the case of aluminum alloys wheels, the change of a heat treatment hardenable alloy for another one, whose mechanical properties are obtained directly from the low pressure and permanent mold casting may configure a significant fabrication time reduction and allows the elimination of steps that spend high energy levels and high cost equipment. This work has determined the mechanical properties of AA413.1 aluminum alloy cast under low pressure and permanent mold and its correlation with internal structure. Tensile test and rotating fatigue test specimens were taken from the wheel spokes. The achieved 10^6 cycles fatigue limit was 91 MPa, while the mean porosity was 1,2 %, and secondary dendritic arm spacing was $33 \pm 4 \mu\text{m}$. The achieved elongation was $3,64 \pm 0,14$ % and the yield strength and tensile strength were, respectively, 80 ± 4 MPa e 165 ± 5 MPa.

Keywords: *Automotive wheel, Fatigue, Rotating bending machine, Aluminum Alloy.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de classificação das ligas de alumínio	18
Figura 2 - Diagrama de fases de uma liga de alumínio comercial	19
Figura 3 - Microestruturas características das ligas de Al-Si.....	20
Figura 4 - Influência do Resfriamento na microestrutura da Liga Al-Si 5 %	21
Figura 5 - Níveis de hidrogênio nas ligas de alumínio silício	26
Figura 6 - Representação esquemática da microestrutura do fundido	27
Figura 7 - Aspecto típico de um rechupe em ligas de alumínio	28
Figura 8 - Curva de solubilidade de hidrogênio devido à temperatura do alumínio	28
Figura 9 - Porosidade por filme de óxido.....	31
Figura 10 –Representação esquemática da microestrutura	31
Figura 11 - Injetora de baixa pressão.....	32
Figura 12 - Modelo de solidificação direcional.....	33
Figura 13 - Detalhamento do processo de solidificação	33
Figura 14 - Equipamento utilizado para teste de fadiga axial	36
Figura 15 - Equipamento utilizado para teste de fadiga radial.....	36
Figura 16 - Simulação de fadiga radial de uma roda em desenvolvimento.....	37
Figura 17 - Microestrutura da Al-Si11 (AA413.1).....	38
Figura 18 - Carregamento de amplitude constante	41
Figura 19 - Carregamento de amplitude variável definido por blocos de amplitude constante.....	41
Figura 20 - Carregamento de amplitude variável tipo aleatório.....	41
Figura 21 - Formação das bandas de deslizamento pela solitação cíclica e seu aspecto.	43
Figura 22 - Superfície de fratura com falha provocada por fadiga, indicando regiões de início e propagação da trinca.....	44
Figura 23 - Curvas S-N típicas para cargas sinusoidal de amplitude constante.....	45
Figura 24 - Curvas do método padrão.....	47
Figura 25 - Espalhamento dos resultados na determinação da resistência à fadiga	49
Figura 26 - Curvas S-N para diversas probabilidades de ruptura.....	49
Figura 27 - Ensaio de fadiga <i>up-and-down</i> para um aço 4340.....	50
Figura 28 - Ensaio realizados para avaliar a resistência à fadiga de lote de rodas	55
Figura 29 - Modelo de uma roda e suas partes de fabricação	56

Figura 30 - Posição de retirada dos corpos de prova	56
Figura 31 - Espectrômetro de emissão ótica	57
Figura 32 - Local de retirada do corpo de prova para análise química.....	57
Figura 33 - Microscópio Optico Zeiss	58
Figura 34 - Representação esquemática da SDAS bidimensionais	59
Figura 35 – Imagem do nível de porosidade de cada amostra.....	59
Figura 36 - Local de retirada dos corpos de prova	60
Figura 37 - Corpo de prova para ensaio de tração conforme norma	61
Figura 38 - Modelo do corpo de prova utilizada	61
Figura 39 - Vista em corte de uma roda para análise de dureza.....	62
Figura 40 - Corpo de prova utilizado para teste de fadiga	63
Figura 41 - Suporte para fixação do corpo de prova para medição utilizando o micrômetro..	63
Figura 42 - Medição da rugosidade superficial	64
Figura 43 - Equipamento utilizado para realização dos ensaios de fadiga	65
Figura 44 - Representação esquemática das condições de teste e aplicação de carga.....	65
Figura 45 - Microestrutura dos corpos de prova utilizados para teste de fadiga.....	69
Figura 46 - Microestrutura dos corpos de prova utilizados para teste de fadiga ampliada.....	69
Figura 47 - Local de retirada dos corpos de provas.....	70
Figura 48 - Relatório de ensaio de tração.....	74
Figura 49 - Tensão x log do número de ciclos	77
Figura 50 - Probabilidade dos resíduos padronizados	77
Figura 51 - Probabilidade dos resíduos padronizados	78
Figura 52 - Curva S-N com os intervalos de confiança de 1 %, 50 % e 99 % para o alumínio AA413.1	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da liga AA413.1.....	38
Tabela 2 – Propriedades mecânicas da liga AA413.1.....	39
Tabela 3 – Valores recomendados para ensaio de fadiga segundo norma.....	45
Tabela 4 – Dimensões dos corpos de prova conforme norma DIN 50125.....	61
Tabela 5 – Resultado da composição química.....	68
Tabela 6 – Resultado do espaçamento interdendrítico.....	70
Tabela 7 – Resultado da Porosidade por área.....	71
Tabela 8 – Dimensional dos corpos de prova.....	72
Tabela 9 – Rugosidade dos corpos de prova.....	73
Tabela 10 – Resultado de ensaios de tração.....	73
Tabela 11 – Resultado de ensaios de dureza.....	75
Tabela 12- Tensão e números de ciclos.....	76
Tabela 13 – Resultados obtidos pela análise do software MINITAB.....	78
Tabela 14 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga.....	80
Tabela 15 – Limites de resistência a fadiga.....	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Alumínio	17
2.2	Ligas de alumínio	17
2.3	Ligas Al-Si família 4XXX	20
2.4	Processo de fabricação de rodas	23
2.5	Preparação da liga.....	24
2.6	Teor de H ₂	25
2.7	Defeitos comuns em fundição de alumínio.....	26
2.7.1	Macroporosidades ou rechupes	27
2.7.2	Bolhas de gás – porosidade	27
2.7.3	Filmes de óxidos.....	29
2.7.4	Microestruturas.....	30
2.8	Injeção e moldagem da roda.....	31
2.8.1	Solidificação da roda.....	33
2.9	Processo de usinagem de roda	34
2.10	Processo de acabamento.....	34
2.11	Controle de qualidade no processo de fabricação	35
2.12	Liga AA413.1	37
2.13	Fadiga.....	39
2.13.1	Aspectos gerais de fadiga dos materiais	40
2.13.2	Levantamento das curvas S–N	44
2.13.3	Fatores que modificam as curvas S-N	46
2.13.4	Determinação da curva S-N	47
2.13.5	Método estatístico para tensão constante	48
2.13.6	Método para levantamento das curvas <i>up-and-down</i>	49
2.13.7	Método para levantamento das curvas utilizando as probabilidades S-N-P	50
2.13.8	Modelos estatísticos de regressão para dados de teste de vida acelerados	51
2.13.9	Modelo de regressão	51

2.13.10	Ajuste do modelo de regressão	52
2.13.11	Adesão ao modelo	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1	Composição química.....	57
3.2	Caracterização metalográfica das peças.....	57
3.3	Espaçamento interdendrítico	58
3.4	Verificação do nível de porosidade.....	59
3.5	Ensaio de tração.....	60
3.6	Ensaio de dureza Brinel	61
3.7	Ensaio de fadiga	62
3.7.1	Metodologia utilizada para ensaio de fadiga.....	64
3.7.2	Curva S-N.....	66
3.7.3	Planejamento dos ensaios para o levantamento da curva S-N-P.....	66
3.7.4	Determinação do limite de resistência à fadiga (Se)	67
4	RESULTADOS	68
4.1	Composição química.....	68
4.2	Microestrutura	68
4.3	Espaçamento interdendrítico	70
4.4	Porosidade por área.....	71
4.5	Corpos de prova para fadiga.....	72
4.6	Rugosidade nos corpos de prova utilizados para fadiga	72
4.7	Ensaio de tração	73
4.8	Ensaio de dureza	75
4.9	Curva S-N do alumínio AA413.1	75
4.9.1	Ajuste do modelo de regressão.....	78
4.10	Determinação das curvas S-N-P para o alumínio AA413.1.....	79
4.10.1	Cálculo do limite de resistência à fadiga pelo modelo de regressão	80
5	CONCLUSÕES.....	82
5.1	Considerações finais	82
5.2	Sugestões para trabalho futuro.....	82
	REFERÊNCIAS.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

FEA – Elementos finitos.

CFC – Cubica de face centrada.

TIBAL – Composto formado por titânio boro.

DI – Fator utilizado na empresa Mangels para medir o nível de gás dissolvido no alumínio.

HF – Ácido fluorídrico.

N – Vida útil (número de ciclos).

C – Constante do material.

n – Parâmetro de encruamento do material.

R – Coeficiente de determinação.

S_a – Amplitude de tensão cíclica alternada.

S_e – Limite de resistência à fadiga

b – Intercepto da reta com o eixo das tensões.

c – Inclinação da reta na curva S-N.

N_i – Número de ciclos que leva o material à falha na tensão σ_i .

K_i – Inclinação da reta na representação log-log da curva S-N.

b₀ – Intercepto de reta com o eixo das tensões na curva S-N-P.

b₁ – Coeficiente de inclinação da reta.

R_a – Rugosidade média.

R_y – Rugosidade de pico a vale.

T – Tempo de falha.

S_a – Amplitude de tensão cíclica.

S_e – Limite de resistência à fadiga.

β – Coeficiente que depende do material.

β_0 – Intercepto da linha de regressão.

β_1 – Coeficiente de inclinação da reta.

$\Delta\sigma$ – Variação da tensão alternada.

ε – Erro aleatório de resíduos.

ε_f – Deformação.

$\mu(a)$ – Parâmetro de localização.

Φ – Percentil da distribuição normal padrão.

Γ – Parâmetro de escala.

σ – Tensão.

$\sigma\tau$ – Tensão aplicada

σ máx – Tensão alternada máxima.

σ méd – Tensão média.

σ min – Tensão alternada mínima.

λ_2 – Espaçamento dendrítico secundário.

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um material que possui um conjunto de propriedades físicas, químicas, mecânicas e elétricas que o tornam apropriado para várias aplicações na engenharia. Esse material combina a baixa densidade com a alta resistência mecânica, conseguida por algumas ligas de alumínio, que, em alguns casos, podem até ultrapassar a resistência mecânica de um aço estrutural. Tal combinação é a responsável pelo seu crescente emprego na indústria automobilística.

Em tal indústria, a roda é um dos componentes em que se utilizam ligas de alumínio. Inicialmente, essas rodas de liga eram comercializadas como item opcional ou como parte de um pacote de itens opcionais em veículos mais equipados. Assim, sua utilização em veículos não começou como uma medida para reduzir peso, mas como um diferencial de estilo, além de conceder uma classe superior ao produto final.

No entanto, a diminuição de massa do conjunto formado pela roda, pneu e sistema de freios, denominado massa suspensa, é de fundamental relevância no projeto de suspensão de um veículo. Quanto maior for a massa suspensa, maior deverá ser a robustez da suspensão, isto é, do amortecedor e mola, a fim de não comprometer o conforto e a segurança. Assim, o desenvolvimento de novas tecnologias para a fabricação de rodas de ligas mais leves, como a de alumínio, aliado ao fato deste material apresentar um alto índice de reciclagem, está fazendo com que o percentual de veículos, que saem de fábrica, com este tipo de rodas, aumente constantemente.

Em 2012, o governo brasileiro criou o programa INOVAR-AUTO, regulamentado pelo decreto lei 7.819, do dia 3 de outubro de 2012. Com este programa, o governo pretende aumentar em 12 % a eficiência energética dos veículos nacionais. Com esta perspectiva, serão necessárias várias mudanças técnicas na produção de veículos, pois cada 10 % de redução do peso dos veículos corresponde entre 5 % e 10 % de redução no consumo de combustível (ABAL, 2010). Como um automóvel possui no mínimo quatro rodas, qualquer redução no peso deste componente contribuirá para reduzir significativamente o peso do veículo.

A roda é um item de segurança que deve atender aos altos padrões de projeto e de fabricação para proporcionar, além da estética, maior conforto ao dirigir e menor consumo de combustível. Sua função é estrutural, uma vez que o conjunto formado por roda e pneu tem a função de manter o veículo em contato com a pista e transmitir do veículo para a pista. Todos os esforços provenientes do peso do veículo, quais sejam, dos sistemas de tração, de frenagem

e de direção e, em sentido inverso, transmitir para o veículo todos os esforços provenientes das irregularidades e obstáculos da pista durante a rodagem (BARROS NETO, 2009).

A primeira etapa do projeto de uma roda é a simulação dos esforços por análise de elementos finitos (FEA). Para realizar esta simulação é necessário conhecer o comportamento do material e seus limites de resistência mecânica à fadiga, para que seja projetada uma peça a ser aprovada em todos os ensaios posteriores previstos para a validação do produto e que, ao mesmo tempo, tenha o menor peso possível para tornar viável sua produção. Para projetar rodas mais seguras e eficientes, é necessário quantificar e conhecer os fatores que influenciam o limite de resistência à fadiga do material. As rodas de liga leve são projetadas com uma grande variedade de modelos, e esta condição dificulta a determinação de limites de resistência à fadiga, utilizando métodos analíticos.

A utilização da liga AA413.1 representa um diferencial no custo de produção de rodas automotivas porque permite a fabricação delas sem a necessidade do uso de tratamentos térmicos para melhorar as propriedades mecânicas. Entretanto, a liga em questão pode apresentar uma desvantagem em relação à liga A356, tratada termicamente, por possuir propriedades mecânicas inferiores e, por conseguinte, necessitar de maiores seções, o que resulta em aumento do peso do modelo da roda. Esta condição não é totalmente verdadeira, uma vez que a geometria da roda também influencia fortemente na resistência estrutural do modelo.

A busca pela otimização do processo de fabricação para obtenção de rodas a partir da liga AA413.1, com propriedades mecânicas melhores que as atuais, pode resultar em redução na diferença de peso do produto, o que tornaria vantajoso sua utilização devido à eliminação do tratamento térmico e resultaria na redução do custo de fabricação.

1.1 Objetivos

Este trabalho visa analisar a liga AA413.1, utilizada na fabricação de rodas, quanto ao seu comportamento mecânico e, em especial, quanto a fadiga, uma vez que esta propriedade mecânica é relevante neste componente sujeito a carregamento cíclico. Outras características mecânicas como a ductilidade e a dureza, também foram analisadas por ensaios específicos e correlacionadas à microestrutura do material.

1.2 Justificativa

Várias ligas de alumínio são empregadas na fabricação de rodas de liga leve. As ligas da classe 4xxx não são endurecíveis por tratamento térmico e, desta forma, seu emprego na produção de rodas fundidas por baixa pressão pode ocorrer sem que haja necessidade de etapas demoradas e dispendiosas de tratamento térmico. Este fator torna esse material interessante sob os pontos de vista anteriormente citados, e justifica seu estudo para o melhor conhecimento do seu comportamento em fadiga.

Um dos fatores que limita o uso de rodas de liga de alumínio é o custo. Para atender as normas dos fabricantes de veículos e obter a homologação de uma roda, são necessários rígidos controles metalúrgicos e de processo na etapa de fundição. Para alcançar um controle eficiente do processo são necessários altos investimentos em tecnologia e desenvolvimento da fabricação, bem como o conhecimento da microestrutura e da sua interferência no processo de fadiga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Alumínio

O alumínio é um metal de baixa densidade ($2,63\text{g/cm}^3$), alta ductilidade, boa condutividade térmica e elétrica, alta refletividade, possui propriedades antimagnéticas, características de barreira nuclear e alta resistência à corrosão. Sua reciclagem permite uma economia de recursos da ordem de 85 %, com relação à sua obtenção a partir da redução do minério. Enquanto para a fundição sua baixa temperatura de fusão, em torno de $660\text{ }^\circ\text{C}$, é uma vantagem em relação ao aço, esta característica pode se tornar uma limitação para outras aplicações (ASM INTERNACIONAL, 1998).

O consumo mundial de alumínio apresentou um dos maiores crescimentos entre os metais, tornando a sua indústria de processamento a segunda maior do mundo na atualidade. Esta indústria é superada apenas pela indústria do aço (MALAVAZI, 2008).

2.2 Ligas de alumínio

A indústria automobilística tem substituído o ferro fundido e o aço por ligas de alumínio, sendo a razão entre resistência mecânica e peso a principal motivação. Esta resistência específica à tração é fortemente influenciada pela microestrutura polifásica das ligas de alumínio (WARMIZEK, 2004).

Mais de uma dezena de ligas de alumínio é utilizada em diferentes áreas produtivas e de tecnologia, como a automotiva e a aeroespacial. Dentre os principais elementos de liga empregados, quatro ocupam posição de destaque, sendo eles o cobre, magnésio, silício e o zinco (ZOLOTOREVKY *et al*, 2007). Esses elementos são chamados de principais porque são introduzidos em grande quantidade e definem a microestrutura e as propriedades da liga. A adição de mais de um elemento na liga é realizada quando se faz necessário acrescentar algumas características específicas de outro elemento.

Em ligas de alumínio, a presença de elementos altera sua condição microestrutural e eleva a resistência mecânica pela formação de solução sólida dos átomos do soluto (elementos de liga) na matriz do alumínio. Nesta solução sólida, a presença de átomos estranhos à matriz de alumínio, altera os parâmetros de rede da estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), distorcendo a célula unitária da matriz do alumínio e causando aumento na resistência

mecânica, sem prejudicar outras propriedades do material (ASM INTERNACIONAL, 1998). Durante o processo de resfriamento, quando o limite de solubilidade é atingido, ocorre a precipitação de uma segunda fase, normalmente intermetálica e de elevada dureza, como o CuAl_2 ou Mn_2Si . A presença destes compostos tende a aumentar a rigidez da rede cristalina, endurecendo a liga (ASM INTERNACIONAL, 1998).

Devido à quantidade de ligas de alumínio existentes, sua classificação é realizada com base em normas internacionais. No Brasil, a NBR-6834, elaborada conforme nomenclatura da *Aluminum Association* estabelece esta classificação dividindo as ligas em trabalhadas e fundidas (SMITH, 2005). A Figura 1 apresenta um esquema da divisão e classificação das ligas de alumínio.

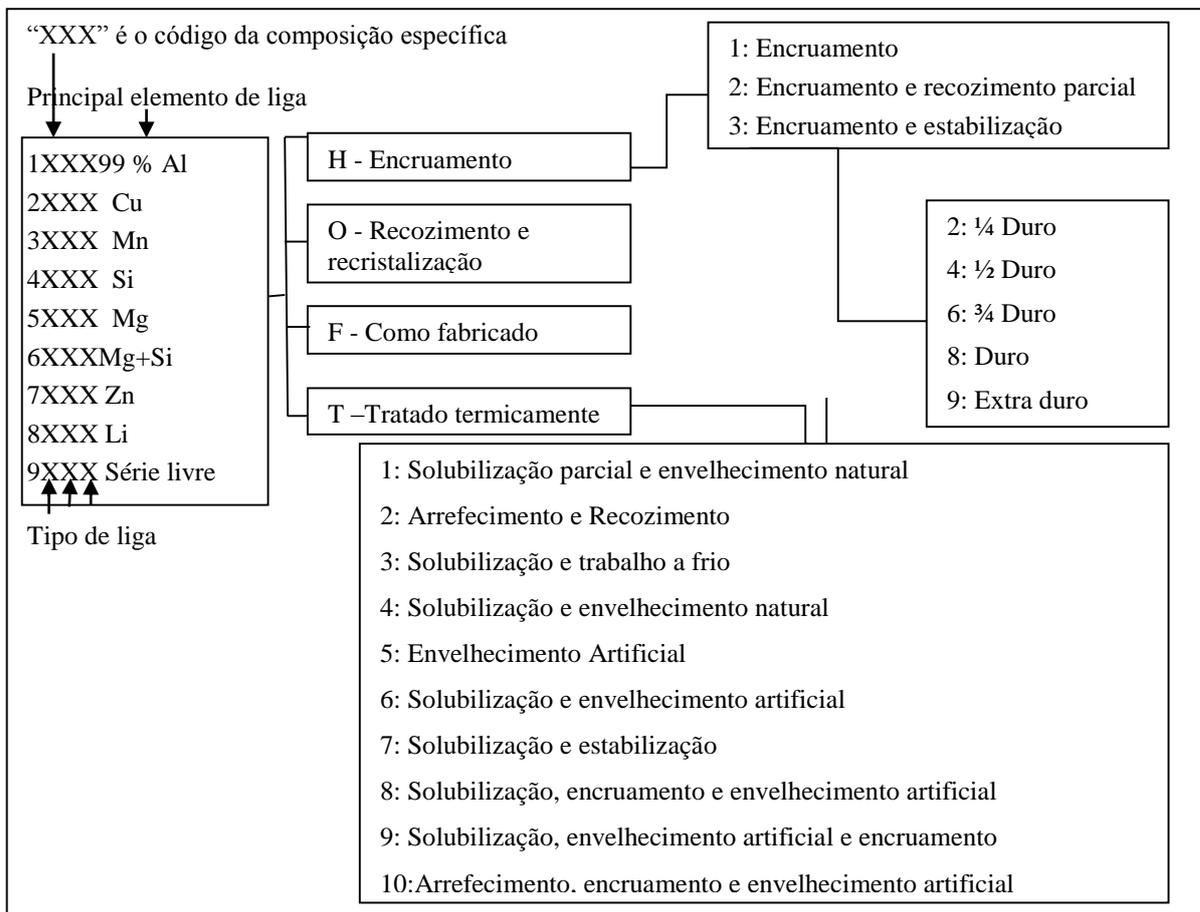


Figura 1 - Sistema de classificação das ligas de alumínio

Fonte: Adaptado de SMITH (2005).

As ligas da família 3XXX e 4XXX são as mais utilizadas no processo de fundição (ASM INTERNACIONAL, 1998). As ligas da família 4XXX, com elevado teor de silício, são muito utilizadas na fabricação de autopeças devido à ótima fundibilidade, ao menor intervalo

de solidificação (comparado a outras ligas de alumínio ricas em Si e outros elementos de liga) e por possuir menor tendência à porosidade espalhada, ou seja, de concentrar este defeito nas regiões de menor perda de calor (ROOY, 1998). Estas ligas são muito utilizadas para fabricação de peças que passam por testes de estanqueidade (MALAVAZI, 2008).

As ligas de alumínio-silício podem ser divididas em três grupos, conforme o teor de silício:

- Eutéticas, com 12,6 % de silício;
- Hipoeutéticas, menor que 12,6 %;
- Hipereutéticas, maior que 12,6 %.

A Figura 2 apresenta o diagrama de fase da liga Al-Si, e a Figura 3, as imagens das microestruturas referentes às composições (a), (b) e (c), indicadas no diagrama de fases.

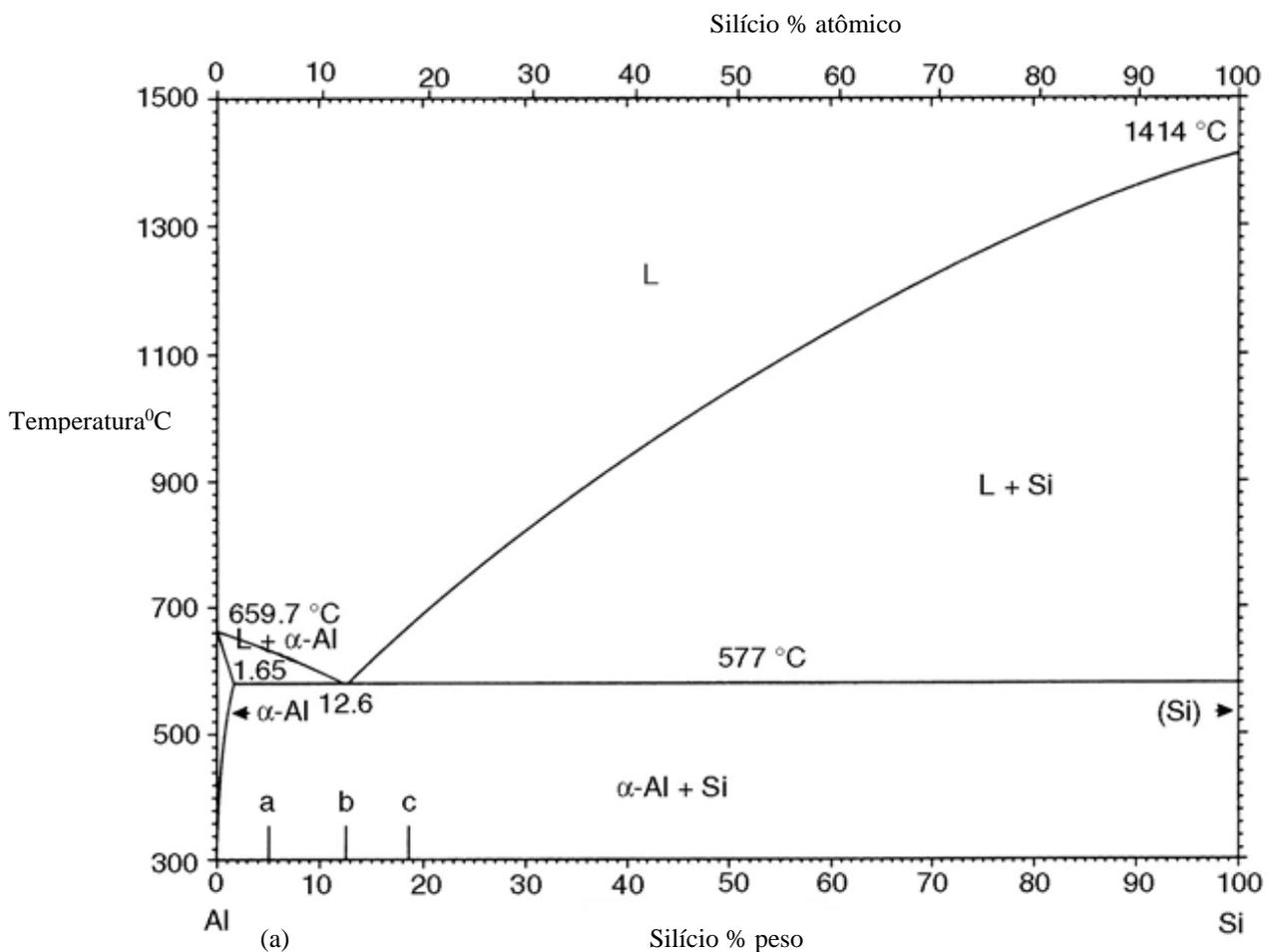


Figura 2 - Diagrama de fases de uma liga de alumínio comercial

Fonte: Adaptado de Warmizek (2004).

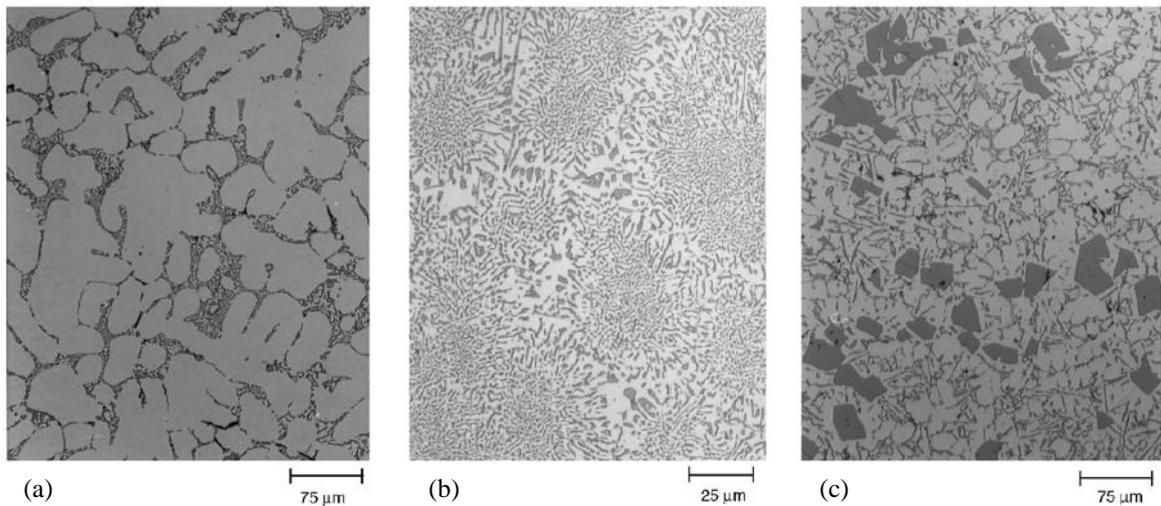


Figura 3– Microestruturas características das ligas de Al-Si¹

Fonte: Warmizek (2004).

Conforme o diagrama da Figura 2, a solubilidade do silício no alumínio, e vice-versa, é bastante limitada, formando um eutético simples à temperatura de 577 °C, com teor de 12,6 % em peso do silício (WARMIZEK, 2004).

As Figuras 3 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, as microestruturas das ligas de alumínio hipoeutética, eutética e hipereutética, caracterizadas pela presença de eutético em fase primária, rica em alumínio na primeira, apenas eutético na segunda e, eutético com fase primária rica em silício na última.

2.3 Ligas Al-Si família 4XXX

Essas ligas de alumínio são muito utilizadas nos processos de fundição para fabricação de peças com geometrias complexas como rodas, pois o aumento da fluidez favorece o preenchimento da cavidade do molde, principalmente em peças de paredes finas. Desta forma, os componentes da liga têm um papel de extrema importância sobre o processo de solidificação (ASM INTERNACIONAL, 1998).

O controle do processo de fundição permite obter excelentes propriedades mecânicas, uma vez que a estrutura formada após a solidificação é determinante para as propriedades do produto final (GARCIA, 2001). Assim, o controle da composição química e da taxa de resfriamento na etapa de solidificação permite definir:

¹(a) hipoeutéticas, (b) eutéticas, (c) hipereutéticas.

- A forma e tamanho dos grãos;
- O espaçamento dos braços das dendritas;
- O tamanho e dispersão da segunda fase;
- As inclusões;
- A forma e tamanho das porosidades;
- Os compostos segregados.

Estes fatores são fundamentais para determinar o limite de resistência do material.

A taxa de resfriamento é determinada pelo tipo de processo de fundição. A Figura 4 apresenta exemplos de microestruturas de uma liga Al-Si 5 % solidificadas com três taxas diferentes de resfriamento, em processos de fundição diferentes, e a relação da microestrutura com a variação de propriedades mecânicas. É possível observar o aumento no limite de resistência à tração com a diminuição do tamanho dos grãos ocasionados pela modificação no processo de fabricação.

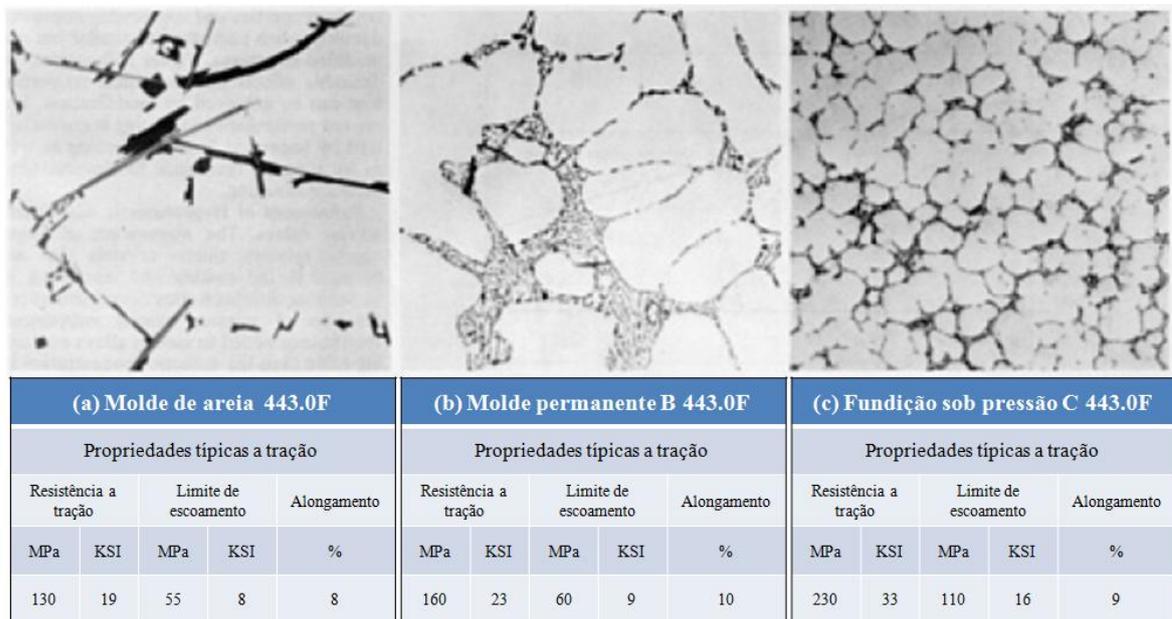


Figura 4 - Influência do resfriamento na microestrutura da Liga Al-Si 5 %

Fonte: Adaptado de ASM Internacional (1998).

A composição química pode ser utilizada para aumentar ou reduzir as propriedades mecânicas na fundição. Os principais elementos encontrados nas ligas de alumínio são:

- O silício diminui a contração de solidificação, aumenta a resistência do desgaste da liga, a resistência na ocorrência de trinca durante a solidificação e o aumento da fluidez da liga para teores crescentes até o ponto eutético, 12,6 % de silício (ASM INTERNACIONAL, 1998). O aumento da fluidez beneficia a alimentação de peças, permitindo ao fundido assumir formas complexas. Outra vantagem da adição de silício é a melhora na usinabilidade da liga (FUOCO, 2001). A maior parte destas ligas são polifásicas, ou seja, apresentam uma matriz com fases precipitadas, de acordo com a composição química (MOLINARI, 1997);
- O zinco, responsável pelo aumento da fluidez, da usinabilidade e da estabilidade dimensional (ASM INTERNACIONAL, 1998). Na presença de outros elementos, como cobre e/ou magnésio, estas ligas podem ser tratadas termicamente ou envelhecidas naturalmente (GRUZLESKI; BERNARD, 1990);
- O titânio, quando presente em compostos na forma de pequenos particulados, atua como nucleador para a solidificação do alumínio primário. Sua função é auxiliar no refinamento de grão, e é geralmente utilizado em combinação com o boro, composto conhecido como “TIBAL” (ASM INTERNACIONAL, 1998).
- O estrôncio atua como um elemento modificador da fase eutética das ligas de Al-Si. Esta modificação pode ser alcançada com baixos teores deste elemento, variando de 0,008 até 0,04 %. As adições acima deste limite estão associadas com porosidades de fundição, principalmente em peças com seções mais espessas, nas quais a solidificação ocorre mais lentamente. A eficiência do processo de desgaseificação também é afetada negativamente, com a adição de estrôncio (ASM INTERNACIONAL, 1998).

Furlan (2008) estudou o comportamento do estrôncio em uma liga A356, e concluiu que as adições de estrôncio, de 20 a 40 ppm, produzem uma microestrutura heterogênea e, quando o nível de elemento está acima de 70 ppm, ocorre a presença de regiões mistas, nas quais o silício cresce com morfologia fibrosa, e regiões nas quais o silício cresce na forma de placas alongadas.

Heuter Patric *et al.* (2016) estudaram o comportamento do estrôncio em oito ligas hipoeutéticas quanto à fadiga rotativa, variando os teores de cobre e magnésio, além do estrôncio, e concluíram que as ligas que apresentavam maiores teores de Sr apresentavam uma microestrutura mais refinada, retardando o aparecimento das

trincas e aumentando o tempo de vida. Neste trabalho o autor relata que a presença do cobre junto ao estrôncio aumenta o limite de resistência à fadiga.

- O manganês possui solubilidade de 1,8 % a 657 °C no alumínio, e inferior a 0,2 %, na temperatura ambiente. A adição de manganês nas ligas injetadas ocorre entre 0,2 % a 0,55 %, com a finalidade de atuar como refinador de grão para reduzir a contração. A grande função deste elemento é neutralizar o ferro, evitando a precipitação de compostos primários e consequente fragilização da liga. Em conjunto com o ferro forma o composto escrita chinesa (ASM INTERNACIONAL, 1998).
- O antimônio, que é um elemento modificador da morfologia da fase eutética, das ligas Al-Si hipoeutética, transformando-a em lamelar quando utilizado em concentração igual ou maior que 0,05 %. Sua eficácia só é alcançada quando o fósforo não está presente, o processo de solidificação possui uma taxa de resfriamento controlado. As principais desvantagens deste elemento são de reagir com o sódio ou estrôncio, formando compostos intermetálicos grosseiros, e de ser um metal pesado, com alta toxicidade (ASM INTERNACIONAL, 1998).
- O magnésio, que aumenta a resistência e dureza pela formação de um composto intermetálico, o Mg_2Si (ASM INTERNACIONAL, 1998). No estudo realizado por Santos *et al.* (2006), foi comparado a resistência à fadiga de duas ligas Al-Si, utilizadas na fabricação de blocos de motor. As ligas com maiores teores de Mg, apresentam maior resistência à fadiga.

2.4 Processo de fabricação de rodas

Os fabricantes de rodas de liga leve estão constantemente buscando melhorias no processo de fabricação, visando aperfeiçoar a qualidade de seus produtos e reduzir os custos de fabricação (DUAN *et al.*, 2015). Rodas de alumínio podem ser fabricadas por vários processos, sendo o forjamento e a fundição por injeção em baixa pressão, os mais utilizados. O processo de forjamento tem algumas desvantagens, os equipamentos são muito caros e não são indicados para o modelo de rodas com geometria complexa (SATYANARAYANA e SAMBAIAH, 2012).

Para Hsu e Yu (2006), o processo de fabricação por gravidade é o mais utilizado para produção de rodas de liga para automóveis de passageiros. Conforme Fuoco (2001), Zhang *et al.* (2005) e Satyanarayana e Sambaiah (2012), o processo de baixa pressão é o mais adotado pela maioria dos fabricantes, pois melhora a qualidade devido ao controle preciso do ciclo de moldagem e solidificação, empregando equipamentos de menor custo. No processo de baixa pressão é possível produzir em grande escala, com alto grau de automatização. As peças produzidas possuem um bom acabamento superficial, com superfície lisa e brilhante.

O processo de fabricação é um dos fatores determinantes das propriedades mecânicas das rodas. Hsu e Yu (2006) estudaram o processo de solidificação utilizando um software de simulação de moldagem. A utilização da simulação do processo de fundição pode ser usada para prever a qualidade de uma roda fundida até encontrar parâmetros ideais do processo de fundição.

Outros autores como Bosi, Garagnani e Toyo (2002), estudaram diferentes modelos de rodas produzidas em liga de alumínio e concluíram que a geometria ou alterações nas taxas de resfriamento influenciam fortemente a microestrutura e a distribuições das tensões internas da peça. Neste trabalho ficou evidenciado que a microestrutura dendrítica mais grosseira nas rodas foi ocasionada pela variação da geometria, fazendo com que as taxas de resfriamento fossem mais baixas durante o processo de solidificação.

Desta forma, para atender às constantes demanda da indústria automobilística por rodas mais leves e resistentes, é necessário que o processo de fabricação seja controlado.

2.5 Preparação da liga

O processo para obtenção da liga de alumínio para a fabricação de rodas tem início na fusão do lingote, realizada em forno tipo torre. Neste processo, a fusão do metal ocorre na torre e o metal líquido desce para uma bacia, na qual é acondicionado. Uma carga de refugo ou reciclagem de peças reprovadas ou de cavaco de alumínio retirado no processo de usinagem pode ser adicionada ao forno para a fabricação da liga, até 30 % em massa. Este percentual pode variar, conforme exigência de propriedades mecânicas feitas pelos clientes. Em seguida, o metal é acondicionado em painéis de transferência, nas quais são acrescentados elementos refinadores de grãos (titânio e boro) e modificadores (sódio ou estrôncio) e o magnésio.

A adição de elementos refinadores varia de 0,05 % até 0,15 % de titânio. O método mais eficiente é a utilização de anteliga com partículas de titânio-boro. O efeito refinador do titânio tem seu pico ocorrendo em cerca de 5 minutos após a adição, reduzindo gradativamente a partir deste instante (FUOCO, 2001).

No processo de baixa pressão, utiliza-se o estrôncio como elemento modificador, apesar de ter um custo mais elevado que o sódio, este elemento possibilita um maior controle devido a sua maior estabilidade e tempo de atuação (FUOCO, 2001).

2.6 Teor de H₂

A presença de hidrogênio na liga é prejudicial à qualidade da peça. Para controlar a presença deste gás é realizada uma desgaseificação controlada no banho, por meio de um rotor com injeção de um gás inerte (argônio ou nitrogênio).

Para análise do teor de H₂ foi desenvolvido um procedimento experimental, no qual são retiradas duas amostras do metal com um cadinho de 40cm³, volume correspondente a 100g de alumínio. Uma amostra será solidificada no vácuo e a outra em atmosfera ambiente. Após a solidificação é determinada a densidade das amostras pelo princípio de Arquimedes.

Com estes resultados é verificado o nível de gás do metal, utilizando a Equação 2.1. Analiticamente, foi determinado que cada nível de gás na amostra corresponde a um fator específico, denominado DI.

$$DI = \frac{\text{densidade na atm} - \text{densidade no vácuo}}{\text{densidade na atm}} \quad (2.1)$$

Utilizando o DI é possível determinar o nível de hidrogênio da amostra. A densidade teórica para esta liga é de 2,66g/cm³ (MATWEB, 2015). Na Figura 5 constam exemplos de macroestruturas da liga com três teores (níveis) de gás dissolvido. As normas de fabricação de rodas não determinam o teor máximo de H₂ permitido nas ligas de alumínio. Porém, a experiência mostra que as peças com DI maior que 2 apresentam grande quantidade de poros, fragilizando a roda.

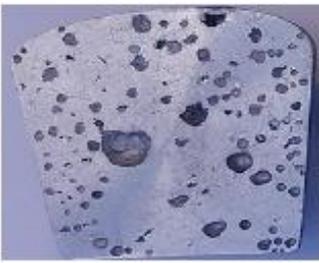
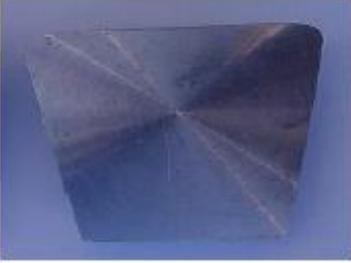
1	2	3
		
$DI = 13$ $= \frac{0,35\text{cm}^3 \text{ H}_2}{100\text{gr Al}}$	$DI = 5$ $= \frac{0,09\text{cm}^3 \text{ H}_2}{100\text{gr Al}}$	$DI = 2$ $= \frac{0,01\text{cm}^3 \text{ H}_2}{100\text{gr Al}}$

Figura 5 - Níveis de hidrogênio nas ligas de alumínio silício

Fonte: Dados coletados pelo autor na empresa Mangels Industrial S.A.

Durante a transferência do metal para os fornos das injetoras pode ocorrer nova absorção de H_2 devido ao turbilhonamento do metal líquido. Para minimizar este efeito são utilizados projetos especiais de cadinhos em forma de chaleira (FUOCO, 2001).

2.7 Defeitos comuns em fundição de alumínio

Durante o processo de solidificação, podem surgir defeitos que fragilizam a peça. O processo de fundição ou fatores como atmosfera, ambiente, transporte ou manuseio inadequado do metal líquido geram defeitos.

Defeitos, apesar de não serem visíveis na superfície da peça, comprometem a usinabilidade e funcionalidade da mesma. Falhas internas, como porosidade, podem ocorrer no processo de fundição, reduzindo a resistência mecânica e estanqueidade.

A presença de defeitos como porosidade tem grande influência no processo de formação e iniciação de trinca. A ocorrência destes defeitos tem influência significativa nas propriedades mecânicas como ductibilidade e fadiga (ASM INTERNACIONAL, 1998).

Existem vários tipos de defeitos, sendo os principais: Macroporosidade ou rechupes, bolhas de gás e filmes de óxidos serão explicados nos itens 2.7.1 até 2.7.3.

2.7.1 Macroporosidades ou rechupes

O rechupe ocorre na mudança de fase do material, quando este passado estado líquido para o sólido. Com isto, o metal perde calor para o molde, diminuindo a agitação interatômica. Com a redução da agitação entre os átomos, ocorre uma aproximação entre eles, ocasionando um efeito chamado de contração volumétrica. Esta contração provoca forças internas no fundido, ocasionando vazios internos chamados de porosidade por contração no interior da peça ou rechupe na superfície (ZHANG *et al*, 2005).

A Figura 6 apresenta o aspecto típico de um rechupe encontrado em uma liga de alumínio silício. Rechupes possuem aspecto tridimensional, e esta condição os diferencia da porosidade ocasionada por gás, que apresenta uma morfologia esférica.

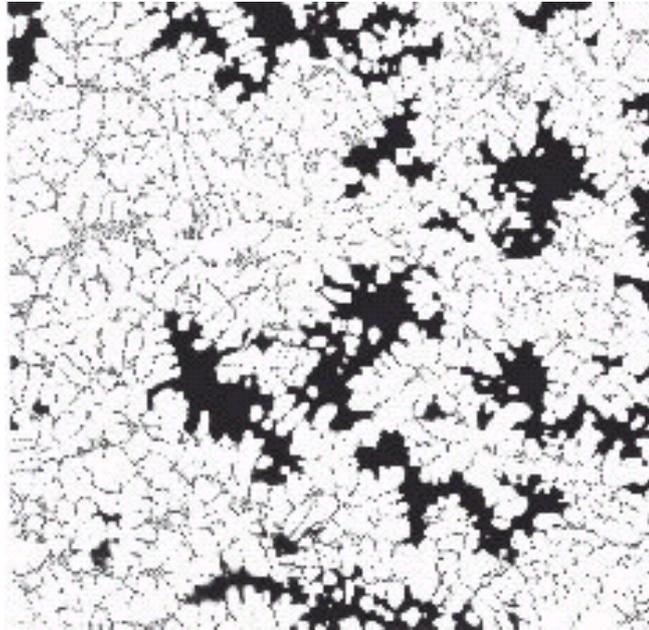


Figura 6 - Aspecto típico de um rechupe em ligas de alumínio

Fonte: Fuoco (2001).

2.7.2 Bolhas de gás – porosidade

A porosidade ocasionada por gás possui um formato esférico, apresentando paredes internas lisas e brilhantes, quando provenientes de hidrogênio ou ar. Quando as paredes dos poros são escuras, a porosidade é proveniente de desmoldantes e graxas utilizadas no processo de injeção (GARCIA, 2001).

Nas ligas de alumínio em estado líquido, o único gás que consegue se dissolver é o hidrogênio, e a principal fonte deste gás é o vapor de água. A molécula de hidrogênio é rapidamente absorvida produzindo a seguinte reação química: $3\text{H}_2\text{O} + 2\text{Al} = 6\text{H} + \text{Al}_2\text{O}_3$

(ASM INTERNACIONAL, 1998). O que determina a quantidade de hidrogênio absorvido na liga de alumínio é a temperatura, ou seja, à medida que a temperatura aumenta, o volume de hidrogênio em solução sólida aumenta rapidamente (CETINEL, 2001), conforme Figura 7.

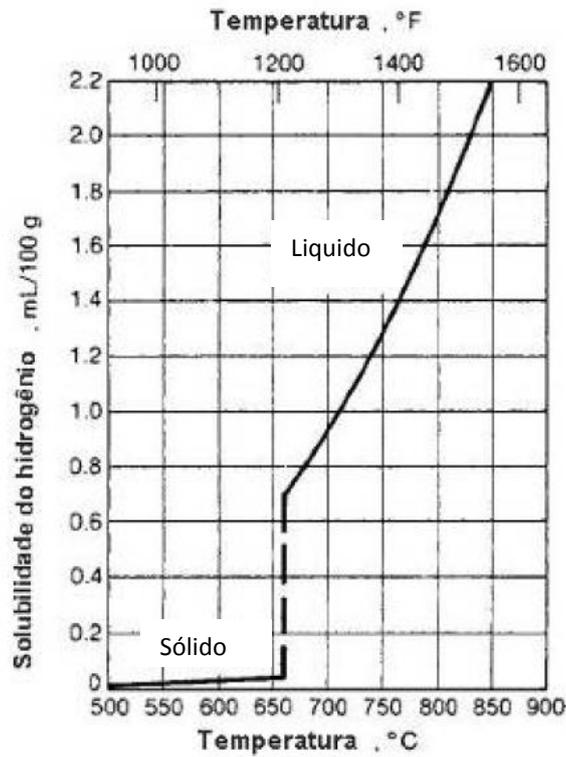


Figura 7 - Curva de solubilidade de hidrogênio devido à temperatura do alumínio

Fonte: Adaptado de Cetinel (2001).

Na Figura 8 é possível identificar um poro de uma liga de alumínio durante a solidificação (MAGNABOSCO, 2000).

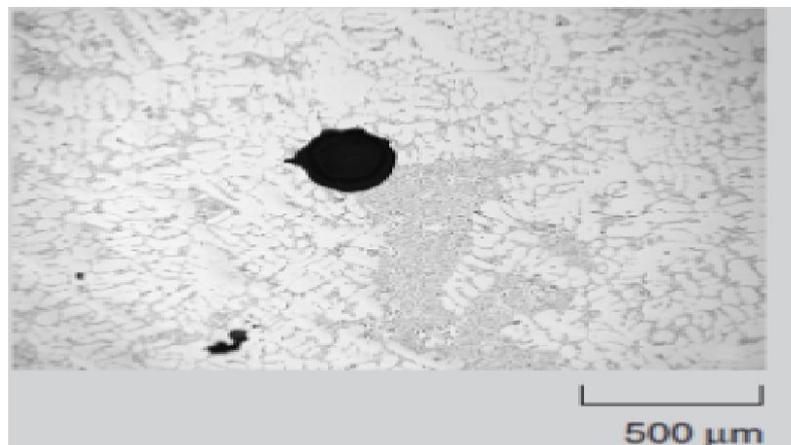


Figura 8 - Porosidade por gás presente em uma liga de alumínio

Fonte: Magnabosco (2000).

Na produção de rodas, a porosidade é um dos defeitos mais difíceis de serem eliminados. Ele ocorre quando o líquido ou metal semi sólido aprisiona o gás, formando bolhas de gás. A mudança de volume, contração do metal líquido, que varia entre 5 % e 7 %, é muito difícil de ser controlada, devido ao perfil que tem que ser solidificado (DUAN *et al.*, 2015).

A resistência à fadiga é prejudicada pela porosidade. Esta condição foi estudada por Boromei *et al.* (2010), caracterizando aspectos microestruturais e solidificação de blocos de motor fundidos, com ligas de Al-Si. Eles concluíram que as condições de solidificação são muito diferentes de uma área para outra, ocasionando uma variação na microestrutura. Regiões com maiores porosidades ou rechupes promovem a falha prematura, com uma alta dispersão de dados, devido à variabilidade no tamanho crítico dos poros. Outro ponto importante citado é o efeito prejudicial de um poro quanto à concentração de tensões locais.

2.7.3 Filmes de óxidos

Quando no estado líquido, o filme de óxido formado na superfície do metal atua como proteção à absorção de hidrogênio (LIU; SAMUEL A.M; SAMUNEL F.H, 2003). Mas, durante o enchimento da peça, este óxido pode entrar para o interior da peça, gerando porosidade. No interior da peça, esta porosidade tem o formato de um filme dobrado e é conhecido como “junta fria” (WARMIZEK, 2004). Um exemplo de filme de óxido é apresentado na Figura 9.

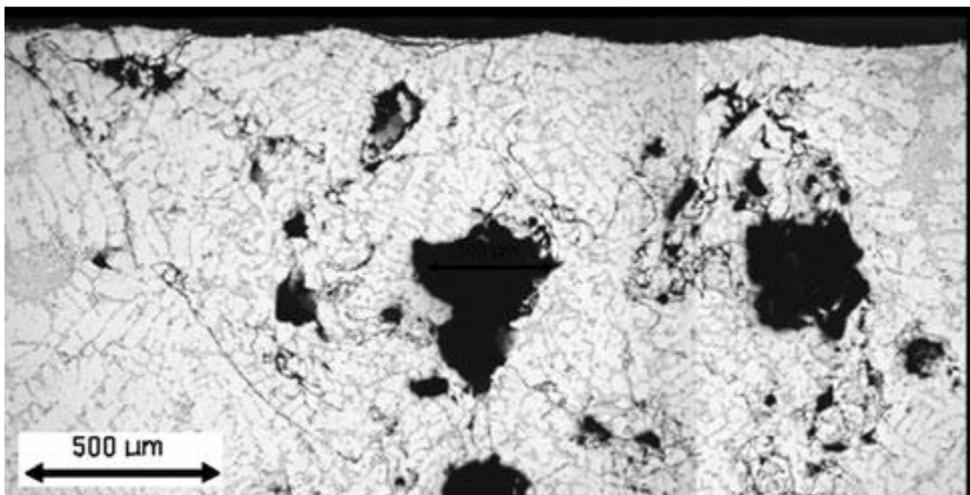


Figura 9 - Porosidade por filme de óxido

Fonte: Liu; Samuel (2003).

Durante o processo de solidificação também podem ocorrer outros defeitos internos nas peças fundidas, ocasionados durante o enchimento do molde. Alguns autores como: Liu, Samuel e Samuel (2003), realizaram uma investigação estudando o papel do estrôncio em até 600 ppm (0,06 %), na formação de porosidade em Al-Si. Estes autores identificaram que os poros encontrados nestas ligas estão associados com óxido de estrôncio, na forma de filmes ou partículas. Essas partículas ou filmes são formados durante a fusão, devido à alta afinidade do oxigênio e do estrôncio. Estes óxidos são extremamente difíceis de serem removidos durante a desgaseificação, com argônio, em rotores rotativos. Outro ponto citado pelos autores é que os poros apresentam morfologia redonda ou irregular, determinada pela forma de óxido, isto é, podem ser finos e dispersos. Poros arredondados também podem ser encontrados em regiões eutéticas Al-Si. Os óxidos de alumínio também atuam como locais favoráveis para a precipitação de outra fase, como a β -Al₅FeSi.

2.7.4 Microestruturas

A microestrutura é determinada no processo de resfriamento da solidificação. A análise da microestrutura fornece informações sobre o processo de solidificação e comportamento mecânico.

A Figura 10 exibe a representação esquemática da microestrutura do fundido, demonstrando os braços das dendritas, fases, contorno de grão e porosidade intergranular.

Peças que oferecem estrutura completamente dendríticas apresentam espaçamento interdendrítico primários e secundários (GARCIA, 2001). Essas estruturas, juntamente com os elementos segregados, porosidades e contorno de grão, caracterizam um arranjo estrutural responsável pelas características mecânicas resultantes (GARCIA, 2001).

Grãos refinados e equiaxiais apresentam melhores propriedades mecânicas (GARCIA, 2001). Outro item determinante para as propriedades mecânicas é o espaçamento interdendrítico secundário, que está diretamente relacionado com a taxa de resfriamento (ZHANG *et al*, 2005).

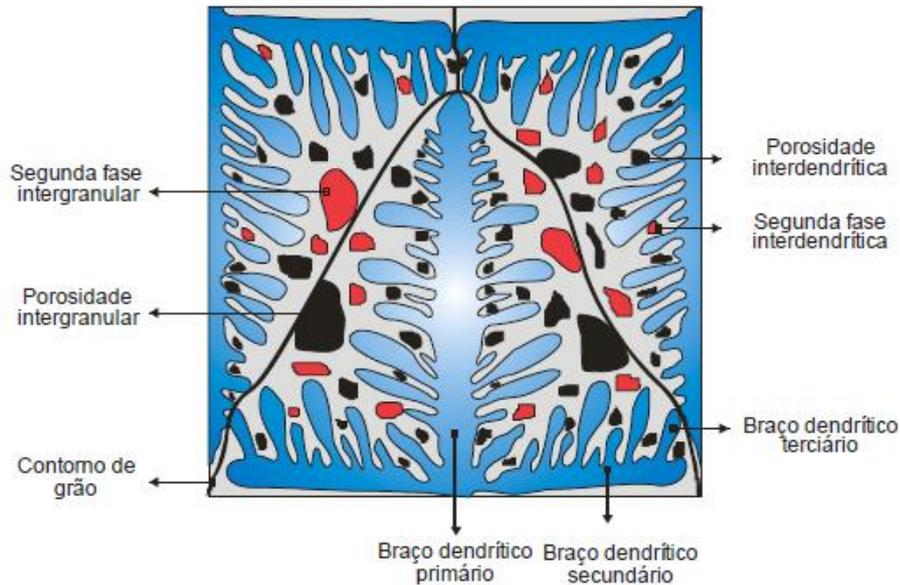


Figura 10 - Representação esquemática da microestrutura

Fonte: Garcia (2001).

Quanto menor for o espaçamento, maior é a resistência mecânica dos produtos (GARCIA, 2001). Uma microestrutura pode ser considerada fina quando apresenta espaçamento (λ_2) de 15 até 30 μm , e grossa quando apresenta espaçamento maior que 50 μm (ZHANG, 2010).

O controle da estrutura eutética é um fator que também determina as propriedades mecânicas do material. O refino da estrutura eutética de uma liga alumínio silício é um fator que também deve ser controlado. Este refino é conhecido como tratamento de modificação, e pode ser realizado com o aumento da taxa de resfriamento ou adição de agentes químicos modificadores (GARCIA, 2001). Alguns estudos realizados em uma liga de Al-Si, por Furlan (2008) e Mohamed *et al.* (2015), concluíram que a falta de estrôncio na composição gera uma microestrutura acicular das partículas de Si, ou seja, sem o tratamento de modificação acelera a propagação de trincas, reduzindo a ductibilidade do material.

2.8 Injeção e moldagem da roda

A liga é transportada para um sistema de máquinas injetoras que trabalha sob pressão de aproximadamente 1,0 kgf/cm^2 , considerada fundição a baixa pressão. O forno é pressurizado fazendo com que o metal líquido suba por um tubo cerâmico ou metálico com revestimento cerâmico, até a cavidade do molde.

O enchimento e a alimentação são realizados pela região central da roda, o metal líquido sobe pelo tubo pescador e entra no canal de injeção, e está sujeito a um elevado gradiente térmico, gerado pela temperatura e pressão durante o enchimento do molde.

Para evitar a presença de óxidos e impurezas no interior da roda é colocada uma tela-filtro na região onde ocorre à entrada do metal líquido. Após a solidificação, esta tela-filtro fica presa no canal de injeção, que é cortado posteriormente. Na Figura 11 há um exemplo de uma injetora de baixa pressão.



Figura 11 - Injetora de baixa pressão

Fonte: Foto tirada pelo autor na empresa Mangels Industrial S.A.

Finalizada a solidificação, o molde é aberto e a roda transportada para a bandeja de transferência. Coloca-se uma nova tela-filtro e o molde é novamente fechado para o início de um novo ciclo. O tempo médio de injeção e solidificação de uma roda varia de 5 a 6 minutos, de acordo com a geometria e o tamanho da roda (ZHANG *et al*, 2005).

Após a retirada da roda do molde, ela é inspecionada por equipamento radiográfico, a fim de detectar porosidades e defeitos internos que possam fragilizá-la. Como este componente é um item de segurança e está sujeito a elevados impactos e tensões de trabalho, qualquer descontinuidade interna pode fragilizar a peça (FUOCO, 2001; ZHANG *et al*, 2005).

No Brasil, a NBR 6752 (2013) e as normas de fabricantes de veículos estabelecem os critérios que são utilizados para inspeção, com base na norma ASTM E155 (2010).

2.8.1 Solidificação da roda

A técnica de solidificação direcionada consiste na redução gradativa da parede do molde, iniciando no canal de injeção até o ponto mais extremo da roda. Para fazer a refrigeração forçada são utilizados ar e água em diferentes pontos do molde, distribuídos de acordo com a geometria.

A região que apresenta pior condição para solidificação é a junção aleta/aro, pois é extremamente espessa e de resfriamento lento, mas não é uma região crítica quanto à sollicitação mecânica (FUOCO, 2001).

As Figuras 12 e 13 demonstram como é realizado o processo de solidificação direcional de uma roda. O processo inicia com a solidificação do ponto mais extremo e mais fino, até o canal de injeção, central e espesso.

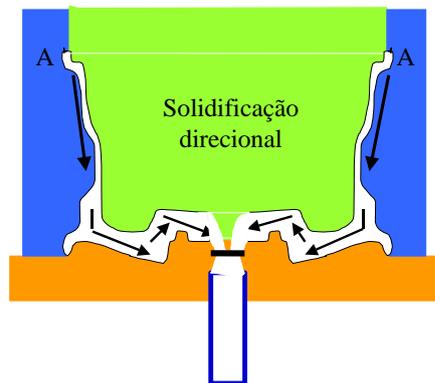


Figura 12 - Modelo de solidificação direcional

Fonte: Fuoco (2001).

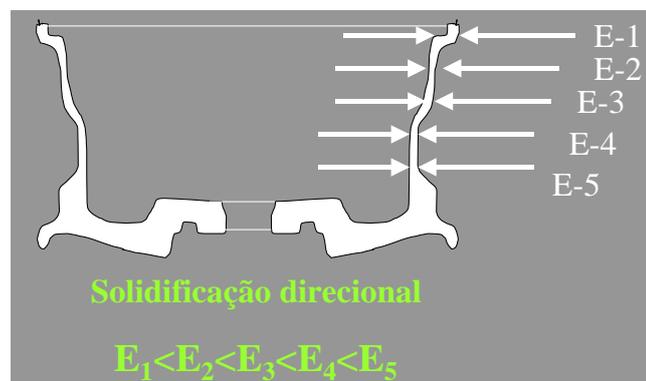


Figura 13 - Detalhamento do processo de solidificação

Fonte: Fuoco (2001).

Devido ao perfil complexo, pode ocorrer a solidificação prematura do aro e das aletas, isolando poças de alumínio líquido, gerando porosidades por rechupes nas regiões afetadas (FUOCO, 2001).

2.9 Processo de usinagem de roda

Após a desmoldagem da roda, ela segue para a etapa de usinagem, na qual adquire sua geometria final, em tornos e furadeiras CNC. Nesta fase, são retirados os excessos de material proveniente da fundição, produzindo uma roda com precisão dimensional da ordem de centésimo de milímetros, conferindo uma perfeição geométrica à peça.

Esta precisão dimensional permite melhor acoplamento com o pneu e com a ponta de eixo ou cubo de rodado veículo. Estas dimensões precisam satisfazer os requisitos de segurança em qualquer condição operacional do veículo. As forças que atuam sobre a roda, resultantes de tração e frenagem, cargas e forças direcionais, devem ser absorvidas sem prejudicar a durabilidade ou a função das rodas ou dos componentes do eixo.

2.10 Processo de acabamento

Este processo confere ao produto seu aspecto final e proteção contra corrosão. É dividido em várias etapas, dependendo do tipo de acabamento que será aplicado na peça. Os principais tipos de acabamento são: pintado, diamantado, polido e cromado.

O processo de pintura, apesar de parecer simples, pode influenciar significativamente no processo de fadiga de uma roda, pois após a aplicação da tinta, as peças passam por um processo de cura em estufa, aumentando a precipitação da fase β (Mg_2Si).

Em um estudo realizado por Jacobs, Pretoriusbr e Iaubsche (2003), o comportamento à fadiga e a iniciação de trinca em várias amostras foram estudados, e os resultados obtidos indicaram que as rodas que passaram pelo processo de pintura apresentaram limite de resistência para iniciação de trinca superior às peças que não passaram por este processo. O trabalho não foi conclusivo nesta afirmação, visto que outros fatores que não foram avaliados poderiam ter influenciado os resultados.

2.11 Controle de qualidade no processo de fabricação

Para garantir a qualidade das rodas é necessária a realização de ensaios, que podem variar de acordo com a aplicação. No Brasil, a qualidade das rodas, é especificada conforme NBR 6752 (2013), que determina os ensaios para homologação do produto. Alguns destes ensaios já foram descritos acima, como a análise da composição química, a inspeção por raios x, a análise de desbalanceamento e a estanqueidade.

Estes ensaios devem ser realizados em 100 % das peças, enquanto outros ensaios são realizados por amostragem, para garantir a qualidade do produto. Os ensaios por amostragem são realizados durante o desenvolvimento para homologação e com frequência pré-determinada, a fim de garantir a qualidade das peças durante a produção. Os principais ensaios realizados nesta condição são os ensaios de fadiga radial e axial, o ensaio de impacto, análise metalográfica e os ensaios mecânicos.

A integridade do material é determinada pela composição química, microestrutura e avaliação da presença de defeitos, seus tipos e distribuição.

A presença de defeitos no interior das peças é um item que afeta o desempenho do produto. Para Reilly *et al* (2013), o tamanho, a quantidade e a localização dos poros: macro e micro, as inclusões ou filmes de óxidos, podem ter um impacto significativo nas propriedades mecânicas e na fadiga do material. Neste cenário, as rodas podem tolerar um número finito de defeitos e ainda atender às especificações do cliente. A quantidade admissível depende do defeito, de seu tipo e da sua localização.

Os ensaios de fadiga em rodas são realizados em equipamento que simulam as condições de utilização da peça. Existem dois tipos de ensaios, que serão descritos a seguir:

- **Fadiga Axial:** realizado em um equipamento em que o princípio de funcionamento é similar ao de um torno mecânico com um dispositivo para aplicar num momento de força, e uma célula de carga, para medir a reação do sistema. Para o ensaio, a roda é fixada pela borda externa à placa ou castanha do equipamento. Um eixo é fixado ao cubo da roda, simulando a montagem da roda na ponta do eixo de um veículo. Na outra extremidade do eixo, que encontra em balanço, é aplicado um esforço axial gerando um momento. Este sistema é acoplado a um sensor que mede a variação de carga. Com este monitoramento é possível medir a deflexão do sistema durante a realização do ensaio (BARROS NETO, 2009). A ciclagem mínima é de 50.000

ciclos ou de acordo com normas específicas (SAEJ328, 1994), como apresentado na Figura 14.



Figura 14 - Equipamento utilizado para ensaio de fadiga axial

Fonte: Foto tirada pelo autor na empresa Mangels Industrial S.A.

- **Fadiga Radial:** Este ensaio simula os esforços cíclicos que atuam sobre a roda, simulando os esforços atuantes no centro das aletas. Para o ensaio, apresentado na Figura 15, um pneu, do tamanho máximo recomendado para aquele modelo de roda, é montado na roda. A ciclagem mínima é de 600.000 ciclos ou de acordo com normas específicas (SAEJ328, 1994).



Figura 15 - Equipamento utilizado para ensaio de fadiga radial

Fonte: Foto tirada pelo autor na empresa Mangels Industrial SA.

Para o desenvolvimento de uma roda, são necessárias muitas horas de ensaios para validação do produto. Para diminuir esta quantidade de ensaios e reduzir o tempo de desenvolvimento de uma peça, pode ser utilizada a tecnologia de simulação numérica,

apresentada na Figura 16, sendo depois, apenas realizados os ensaios para validação (SATYANARAYANA e SAMBAIAH, 2012).

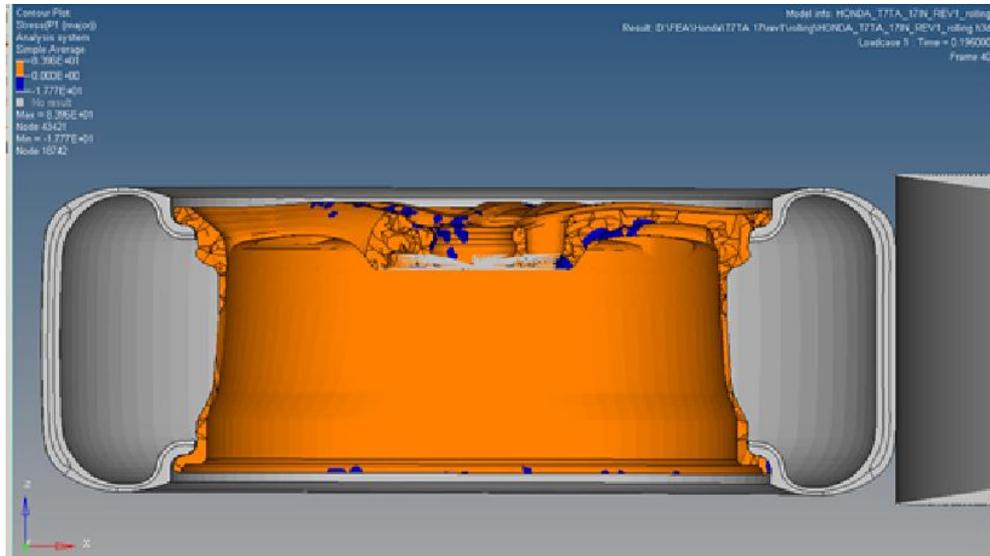


Figura 16 - Simulação de fadiga radial de uma roda em desenvolvimento

Fonte: Simulação feita pelo autor na empresa Mangels Industrial S.A.

Na Figura 16, observa-se uma roda sobre carga radial, durante a simulação de fadiga radial. É possível identificar que as aletas são as regiões mais críticas, porque estão constantemente em sollicitação de tração ou compressão.

2.12 Liga AA413.1

Esta liga apresenta boas características para fundir peças grandes e complexas com seções finas. Devido às propriedades mecânicas, são indicadas para aplicações como: peças arquitetônicas, embalagens de alimentos, equipamentos para laticínios, caixas de ferramentas, luminárias e autopeças (WARMIZEK, 2004).

O resfriamento promove primeiramente a formação da fase α , e depois a formação de células eutéticas, constituídas de fase α e β , a partir de 570 °C. Quando ocorre a presença de outro elemento de liga, como o magnésio, forma-se uma segunda reação eutética, com a presença de três componentes (FUOCO, 2001).

Pode apresentar microestruturas eutéticas com tratamento de modificação acicular, ou uma microestrutura eutética com tratamento de modificação lamelar fibrosa (WARMIZEK, 2004). O padrão ASTM classifica como estrutura aprovada, ou seja, com melhores

propriedades mecânicas, as que apresentam estrutura lamelar fibrosa. As imagens da Figura 17 apresentam a representação destas estruturas, obtidas em microscópio óptico após ataque químico com solução de água com 1 % de HF. Em (a) observa-se a liga sem tratamento de modificação, com aumento de 150X; em (b), a liga sem tratamento de modificação com aumento de 750X; em (c), a liga com tratamento de modificação e aumento de 150X; e em (d), a liga com tratamento de modificação e aumento de 1.200X.

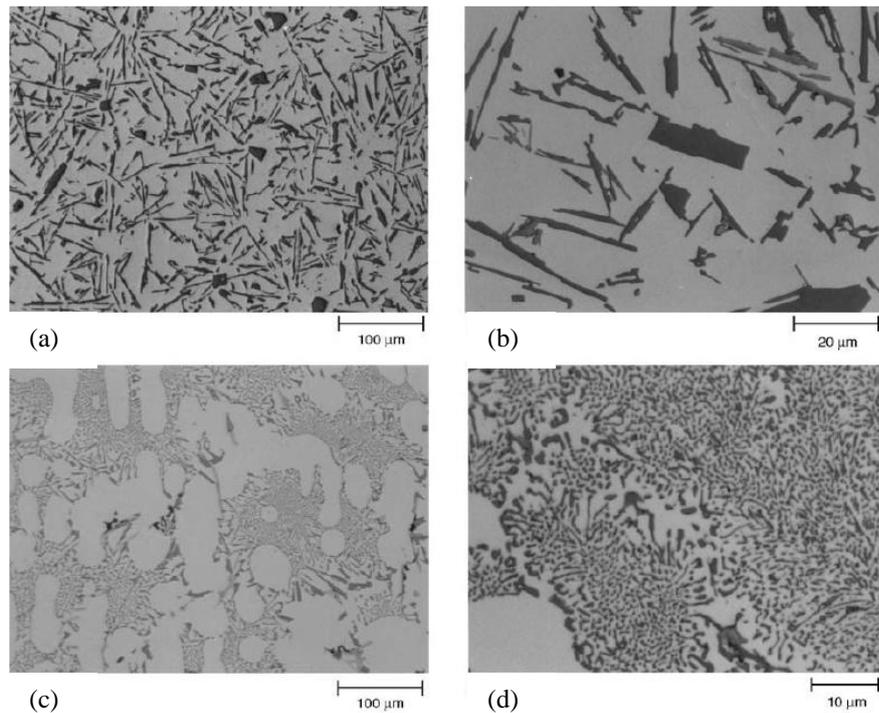


Figura 17 - Microestrutura da Al-Si (AA413.1)

Fonte: Warmizek (2004).

De acordo com o padrão ASTM, as imagens (c) e (d) estão aprovadas por apresentarem fase eutética do silício totalmente esferoidizada, e as imagens (a) e (b) com microestrutura, reprovadas, uma vez que a fase eutética do silício possui um formato de agulhas. A composição química está descrita na Tabela 1 e as características mecânicas na Tabela 2 .

Tabela 1 - Composição química da liga AA413.1

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Outros	Al
11-13	Máximo 1,0	Máximo 1,0	Máximo 0,35	Máximo 0,10	Máximo 0,50	Máximo 0,40	Máximo 0,15	Máximo 0,25	83,25-85,25

Fonte: ASM International (1998).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas da liga AA413.1

Propriedades mecânicas	Valor	Observações
Dureza Brinell	80 HB	
Limite de resistência a tração	296 MPa	
Limite de escoamento	145 Mpa	Considerando deformação de 0,2 %
Alongamento em %	2,5 %	
Módulo de elasticidade	71,0 GPa	
Resistência à fadiga	130MPa para 5x10 ⁸ ciclos	Condição de entalhe desconhecida, teste RR Moore

Fonte: Matweb (2014).

2.13 Fadiga

A fadiga é um processo de mudança estrutural progressiva, localizada e permanente, em que um componente fica sujeito ao carregamento cíclico em algum ponto ou pontos, logo determinando a ocorrência de trincas ou fraturas completas após um número de ciclos (ASM INTERNACIONAL, 1998; XIANG; LIU, 2011). Os ensaios de fadiga devem simular a condição real de utilização da peça.

A ASM (1998) define vida em fadiga como o número de ciclos de tensão que um material suporta, antes de ocorrer à falha de caráter especificado (XIANG; LIU, 2011).

Os primeiros trabalhos publicados sobre o comportamento dos materiais metálicos ocorreram na metade do século XIX, quando August Wöhler apresentou uma das primeiras investigações sobre falhas por fadiga. Ele projetou e desenvolveu uma máquina de fadiga de flexão rotativa para simular a condição de utilização de eixos ferroviários. Os resultados destes ensaios foram registrados em um diagrama S x N, onde S é a tensão aplicada e N é o nº de ciclos até a fratura (SCHUTZ, 1996). A curva S x N é uma importante ferramenta utilizada para exposição de dados experimentais de fadiga. Os valores de S podem ser representados pela tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$), tensão mínima ($\sigma_{\text{mín}}$) ou amplitude de tensão. (SOUZA, 1982). Esta tendência é explicada pela equação abaixo: O número de ciclos aumenta à medida que se reduz o nível de tensões, sendo que, em alguns corpos de prova, é alcançado um limite de fadiga, ou seja, a vida infinita do material.

$$N = C\sigma r^n \quad (2.2)$$

Sendo:

N: Números de ciclos

C: Constante do material

σr : Tensão aplicada

n: Expoente que depende do material

Está análise não permite determinar o tempo para início e propagação da trinca. Para fazer este tipo de análise é necessário levar em consideração a deformação (BOYER, 1986).

Desde os primeiros estudos realizados por August Wöhler no século XIX até os dias atuais, vários pesquisadores estudam este fenômeno devido à importância de estimar a vida de elementos estruturais submetidos a esforços cíclicos.

Com o aumento da demanda da indústria automobilística por peças de alumínio para substituir as peças de aço. Vários autores estão estudando o comportamento das ligas de alumínio em peças automotivas.

Mattos *et al* (2010) estudaram o comportamento em fadiga de uma liga Al-Si 357 utilizada para fabricação de blocos de motor e encontrou limite de resistência à fadiga de 140 MPa, para 1×10^6 ciclos. Ele considerou o nível de porosidade apresentado pelo material como fator determinante do limite de resistência à fadiga.

Mohamed *et al* (2015) analisaram a liga A356 com um tratamento T6, utilizado na fabricação de rodas de alumínio no ensaio de fadiga axial e concluiu que o espaçamento interdendrítico tem influência significativa no limite de resistência à fadiga. Para este estudo foi encontrado o limite de resistência à fadiga de 48 MPa, considerando 1×10^6 ciclos, para amostras com espaçamento interdendrítico secundário (λ_2) de 72 μm , foi de 88 MPa para espaçamento interdendrítico secundário $\lambda_2 = 36,5 \mu\text{m}$.

2.13.1 Aspectos gerais de fadiga dos materiais

A fadiga é progressiva e localizada, uma permanente alteração estrutural que ocorre em materiais submetidos a carregamentos cíclicos de tensões. Após um número de ciclos, pode ocorrer trinca ou fratura do material. As fraturas são causadas pela ação simultânea do carregamento cíclico, da tensão de tração e da deformação plástica mesmo que localizada. Se

algum destes três fatores não estiver presente, a trinca por fadiga não vai se iniciar e propagar. A trinca inicia com a tensão cíclica e a tração produz o crescimento da trinca (BOYER, 1986).

A variação da tensão pode ocorrer de várias formas, sendo o carregamento de amplitude constante o mais simples, conforme Figura 18. Um caso específico desta condição é quando a tensão média é igual a zero, indicando que a cada ciclo o material estará alternadamente sujeito a tensões máximas de tração e de compressão de mesmo módulo. Outras condições de carregamento também são possíveis, como a variação de tensão constante por blocos, apresentada na Figura 19, ou totalmente aleatória, apresentada na Figura 20 (HERTZBERG, 1995).

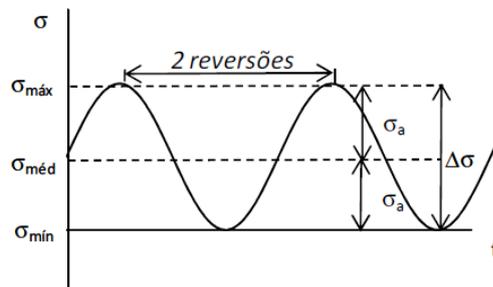


Figura 18 - Carregamento de amplitude constante

Fonte: Silva (2009).

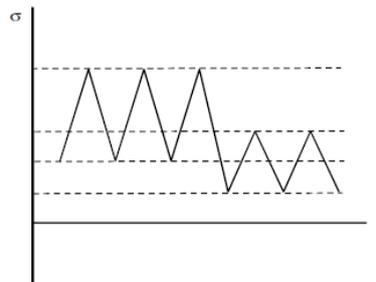


Figura 19 - Carregamento de amplitude variável definido por blocos de amplitude constante

Fonte: Silva (2009).

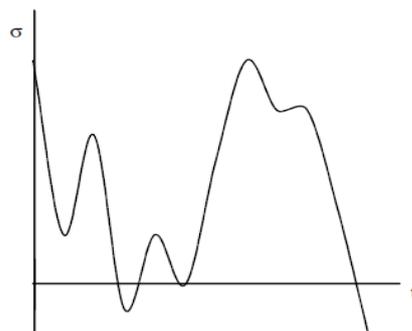


Figura 20 - Carregamento de amplitude variável tipo aleatório

Fonte: Silva (2009).

A tensão média é um fator importante para analisar a resposta de um material à fadiga. Para representar os dados de vida em fadiga é necessário determinar os valores para amplitude, tensão média e razão de tensão, conforme equações 2.3, 2.4 e 2.5 (HERTZBERG, 1996).

Para os carregamentos de amplitude de tensão constante, é possível utilizar as seguintes expressões, que são importantes para o estudo da fadiga:

Variação de tensão (Amplitude) ($\Delta\sigma$) é igual à tensão máxima menos a tensão mínima.

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2.3)$$

A tensão média (σ_{med}) é igual à média entre as tensões máximas e mínimas:

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.4)$$

A razão de tensão (R) é igual à relação entre a tensão máxima e mínima:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{m\acute{i}n}} \quad (2.5)$$

Caso a grandeza controlada seja a deformação, é possível usar as mesmas expressões, substituindo σ das equações acima por ε , assim tendo: $\Delta\varepsilon$, amplitude de deformação; ε_{med} , deformação média e $R\varepsilon$, razão da deformação (SILVA, 2009).

Os modelos apresentados trabalham no domínio das tensões do regime elástico. Estes modelos descrevem a vida total do componente. Existem também outros modelos que foram criados com base nas deformações, os quais são aplicados essencialmente na análise de fadiga e de componentes sujeitos a grandes tensões ou deformações plásticas, que são normalmente usados na previsão de iniciação de trincas de fadiga (SILVA, 2009).

A falha por fadiga abrange três períodos, o início da trinca e o período de crescimento da trinca até a falha. A iniciação da microtrinca ocorre preferencialmente na superfície devido à baixa restrição à plasticidade, devido ao carregamento cíclico (Figura 21). Enquanto uma microtrinca está presente em um único grão, depende somente da estrutura do material, incluindo a sua estrutura cristalográfica e possíveis inclusões. No segundo estágio de crescimento da trinca iniciada na superfície, irá penetrar no interior do material. A partir deste

ponto, a trinca não depende da superfície, mas da resistência do material ao crescimento da trinca (SCHIJVE, 2014).

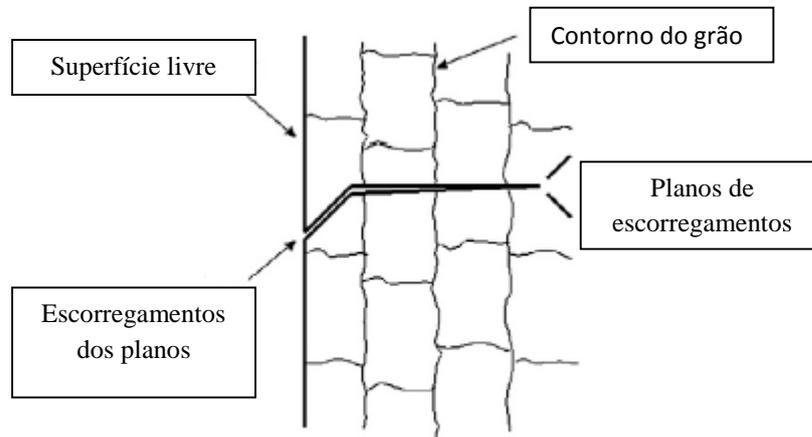


Figura 21 - Formação das bandas de deslizamento pela solitação cíclica e seu aspecto.

Fonte: SCHIJVE (2014).

A Figura 21 apresenta os planos de escorregamentos com os contornos de grão.

O processo de fadiga ocorre em três estágios: início da trinca e propagação desta até um tamanho instável. Quando a trinca atinge uma dimensão crítica, ocorre a propagação intável da trinca em um único ciclo, conforme apresentado na Figura 22.

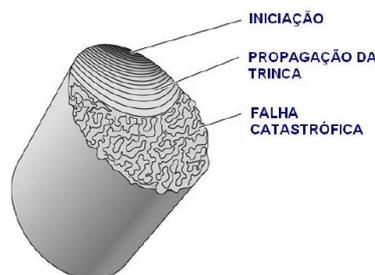


Figura 22 - Superfície de fratura com falha provocada por fadiga, indicando regiões de início e propagação da trinca

Fonte: SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS (2005).

Falhas por fadiga podem ocorrer em níveis de tensão inferiores ao limite de escoamento do material e o processo de falha por fadiga ainda pode ser complicado devido à sua dependência com fatores ambientais, condição de carregamento, microestrutura, estado de tensão, sequência de carregamento, geometria da trinca, e outros (RONDON, 2011; NETO, 2011).

Para materiais que não apresentam defeitos internos, a trinca inicia na superfície. Esta região está sujeita a imperfeições do processo de fabricação, ou até mesmos arranhões ou marcas de batidas podem agir como concentradores de tensões, facilitando o processo de iniciação de uma trinca (BOYER, 1986).

De acordo com Weicheng Cui (2002), o processo de fadiga é dividido em cinco etapas, sendo: 1º nucleação da trinca; 2º propagação da trinca na microestrutura; 3º pequenas trincas até 1 mm; 4º propagação de trincas maiores até 10 mm e 5º falha repentina. Apesar desta condição, a abordagem de dividir a fadiga em dois estágios é a mais encontrada na literatura.

2.13.2 Levantamento das curvas S–N

Geralmente, o método mais simples e mais utilizado para a obtenção da resistência à fadiga de um material é o levantamento da curva S-N, ou seja, a curva associa o número de ciclos de vida a uma dada tensão (HERNANDEZ, 2012). Esta metodologia de análise não é muito adequada para estudos de fadiga de baixo ciclo ($N \leq 10^4$ ciclos). Para fadiga de alto ciclo, a curva S-N oferece grande quantidade de dados para análise, e é indicada para situações em que se espera grande período de vida em fadiga. Este estudo só é válido enquanto o material se mantiver no regime elástico (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

O fenômeno de fadiga possui natureza aleatória, sendo necessário um grande número de ensaios para determinar uma boa conformidade na estatística desta curva (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Cada corpo de prova é submetido a um carregamento, com amplitude constante até a fratura, ou até que ele atinja um número estipulado de ciclos sem fraturar, condição conhecida por “censura”. A quantidade de corpo de prova a ser utilizada no ensaio é determinada de acordo com a finalidade do ensaio. A norma ASTM E739 (2010) determina o número de níveis de amplitude e replicação a ser utilizado, de acordo com o tipo de ensaio conduzido, conforme Equação 2.6. A Tabela 2 auxilia nesta escolha.

$$\text{Replicação \%} = 100. \left(1 - \frac{\text{Número de diferentes níveis de solicitação utilizados}}{\text{Número total de corpos de prova ensaiados}} \right) \quad (2.6)$$

Tabela 33 - Valores recomendados para ensaio de fadiga segundo norma

Tipo de ensaio	Número mínimo de corpos de prova	Replicação mínima (%)
Preliminar	6 a 12	17 a 33 %
Pesquisa e desenvolvimento de componentes e corpos de prova	6 a 12	33 a 50
Dados utilizados em projeto	12 a 24	50 a 75
Dados de confiabilidade estatística	12 a 24	75 a 88

Fonte: ASTM E739(2010).

É possível construir o diagrama da curva S-N, variando as escalas dos eixos cartesianos. A utilização de escala logarítmica facilita a comparação dos dados. Com esta análise é possível construir curvas de diferentes materiais, da mesma forma, reduzindo a escala N.

Para alguns materiais de engenharia apresentados na Figura 23, tais como aço e liga de alumínio, a curva S-N torna-se horizontal em certo limite de tensão. Abaixo deste limite, conhecido como limite de resistência à fadiga, o material pode suportar um número infinito de ciclos sem falha. A parte horizontal, de uma curva S-N representa a tensão máxima que o metal pode suportar por um grande número de ciclos, com 50 % de probabilidade de falha e este limite é conhecido como limite de fadiga. A maioria dos materiais não ferrosos não possui esse limite de fadiga, em vez disso, a curva S-N continua a cair em um ritmo lento à medida que ocorre o aumento do número de ciclos, como mostrado pela curva da liga de alumínio 7075-T6, conforme apresentado na Figura 23.

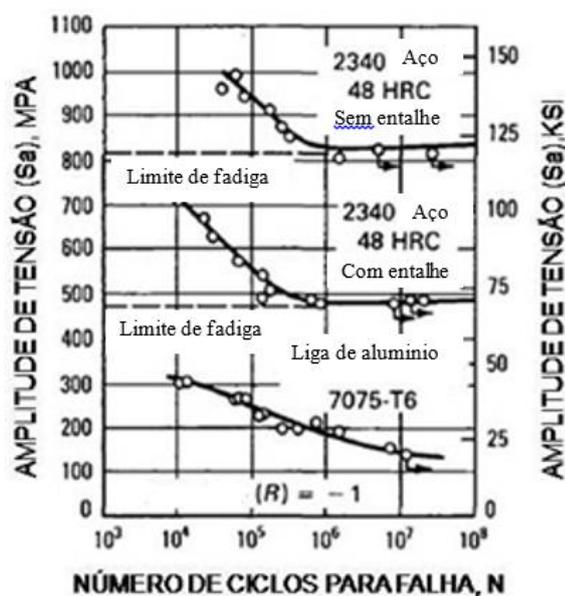


Figura 23 - Curvas S-N típicas para cargas sinusoidal de amplitude constante.

Fonte: Adaptado de ASM INTERNACIONAL (1998)

Para estes tipos de metais, é relatado limite de resistência à fadiga em vez de limite à fadiga, isto é, o nível de tensão ao qual o material pode ser submetido durante um número de ciclos especificados, isso porque não há um número padrão de ciclos para estes metais.

2.13.3 Fatores que modificam as curvas S-N

Os corpos de provas preparados para ensaios de fadiga em laboratórios, visando determinar os limites de resistência, são realizados em condições controladas. Não é realista esperar que o limite de resistência de uma peça iguale os valores obtidos em laboratórios. Fatores como materiais, manufatura, ambiente e projeto, possuem suas influências neste limite de resistência à fadiga (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005):

- Fator de modificação de condição de superfície: depende da qualidade do acabamento da superficial, da peça real e da resistência à tração do material que a constitui (CASTRO, 2009; SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005);
- Fator de modificação de tamanho: para corpos de prova com geometria circular, os valores são determinados de acordo com o diâmetro da peça. Caso a peça tiver uma geometria não circular, deve ser utilizado o conceito de *dimensão efetiva* (d_e), obtida igualando-se o volume de material tensionado, acima de 95 % da tensão máxima, ao mesmo volume em espécime de viga rotativa;
- Fator de carregamento: depende do tipo de carregamento, sendo: 0,59 torsional. 0,85 axial e 1 para flexão;
- Fator de temperatura: quando a peça for projetada para trabalhar abaixo da temperatura ambiente, pode ocorrer uma fratura frágil. Para os casos em que a temperatura de trabalho for superior à temperatura ambiente, pode ocorrer o escoamento, a resistência cai rapidamente com a temperatura;
- Fator de confiabilidade: ocorre devido ao espalhamento dos dados, ou seja, quanto menor a tensão aplicada, maior será a quantidade de corpos de prova necessários para encontrar a tensão média.
- Fator de efeitos diversos: é considerado todos os outros efeitos que podem influenciar no limite de resistência à fadiga, neste caso os valores não estão sempre disponíveis.

Um exemplo de fator de influência é a tensão residual que pode afetar os resultados adversamente. Se a tensão residual na superfície for de compressão, o limite de resistência à fadiga será melhorado (DIETER, 1986).

2.13.4 Determinação da curva S-N

A Curva S-N é derivada de ensaios em amostras de material, nos quais as tensões são aplicadas de forma oscilante e segundo um padrão sinusoidal regular, por um equipamento de ensaio que faz a contagem do número de ciclos até a falha. Esse processo gera um ponto sobre a trama, embora em alguns casos haja um desvio quando o tempo de falha for superior ao disponível para o teste, conforme a Figura 24. A análise dos dados de fadiga requer métodos estatísticos, principalmente a análise de sobrevivência e de regressão linear (HERNANDEZ, 2012).

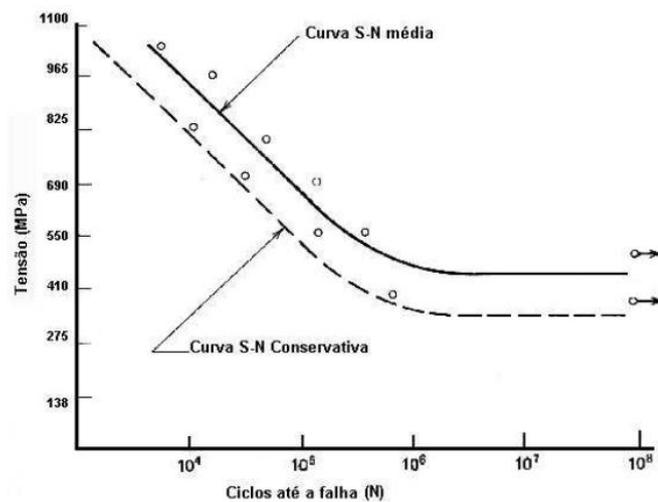


Figura 24 - Curvas do método padrão

Fonte: Castro (2009).

A linha de Goodman é um método para estimar a influência da tensão média sobre a força de fadiga. Inicialmente escolhe-se uma tensão máxima alta (S_{max}) para a qual se espera que a fratura do corpo de prova aconteça em um número de ciclos N pequeno. Essa tensão é geralmente cerca de 2/3 do limite de resistência à tração do material. Para as ligas não ferrosas, este limite é próximo de 35 % do limite de resistência à tração do material. Após o início do ensaio com a tensão máxima determinada, diminui-se progressivamente a tensão para os demais corpos de prova, com a mesma velocidade, até atingir um número N , de acordo com o material (SOUZA, 1982).

Na figura 24, a abscissa é o número de ciclos até a falha, e a ordenada, a tensão aplicada, em escala logarítmica.

A equação de Wohler é dada pela Equação 2.7:

$$S_a = b - c \log(N_i) \quad (2.7)$$

Sendo:

b = Intercepto da reta com o eixo das tensões;

c = Inclinação da reta;

N_i = Número de ciclos;

S_a = Amplitude de tensão alternada.

A equação de Basquim é dada pela seguinte expressão:

$$N_i = C_i [S_a]^{K_i} \quad (2.8)$$

Sendo:

C_i = Constante do material;

K_i = Inclinação da reta

N_i = Número de ciclos

S_a = Amplitude de tensão alternada

Para construção do gráfico é preciso encontrar estas variáveis.

2.13.5 Método estatístico para tensão constante

Para reduzir a dispersão dos resultados dos ensaios com duração superior a 10^4 ciclos, foram elaborados vários métodos de análise, considerando as heterogeneidades metalúrgicas do material (BOYER, 1986; SCHIJVE, 2014). Um desses métodos consiste em fixar alguns valores de tensões máximas e ensaiar vários corpos de prova, obtendo assim, para cada tensão, diversos pontos, conforme a Figura 25. Com base nos dados, deverá ser analisado, com um histograma, cada nível de tensão. A partir desses dados é possível construir curvas S-N para diversas probabilidades de ruptura (SOUZA, 1982).

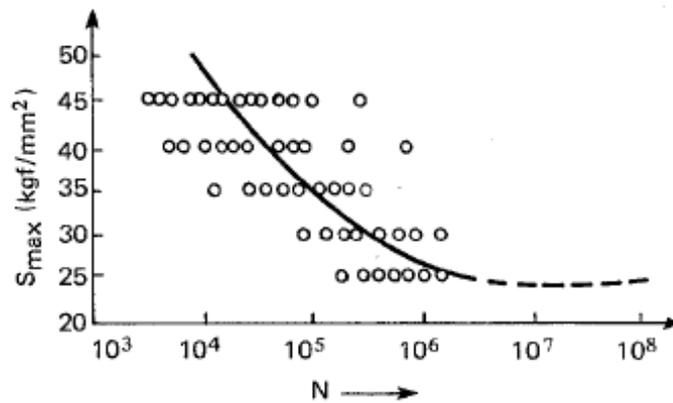


Figura 25 - Espalhamento dos resultados na determinação da resistência à fadiga
Fonte: Souza (1982).

Devido à dispersão de resultados, é necessário o tratamento estatístico dos dados, utilizando a distribuição de Weibull ou log-normal. Para análise dos resultados é necessário a construção de famílias de curva S-N, tendo a probabilidade de falha (P) como parâmetro (FREITAS; COLOSIMO, 1997), conforme apresentado na Figura 26.

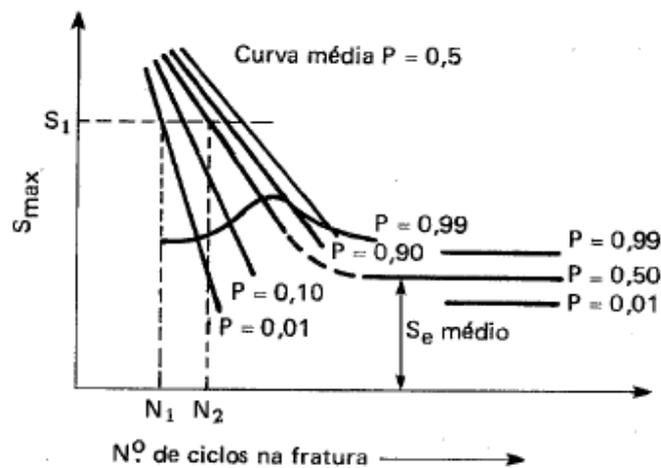


Figura 26 - Curvas S-N para diversas probabilidades de ruptura
Fonte: Souza (1982).

2.13.6 Método para levantamento das curvas *up-and-down*

Para este método de ensaio de fadiga, o primeiro corpo de prova é ensaiado em um nível de tensão acima do limite de resistência, estimado em ensaios como o de tração. Se o corpo de prova falhar antes de atingir a vida útil de interesse, deve-se reduzir o valor da tensão para o ensaio seguinte. Se o corpo de prova atingir o número de ciclos estimados, o valor da tensão deverá ser elevado, conforme Figura 27. Este processo continua sucessivamente,

considerando sempre que o corpo de prova posterior seja ensaiado como uma tensão maior ou menor que o seu antecessor (COLLINS, 2006).

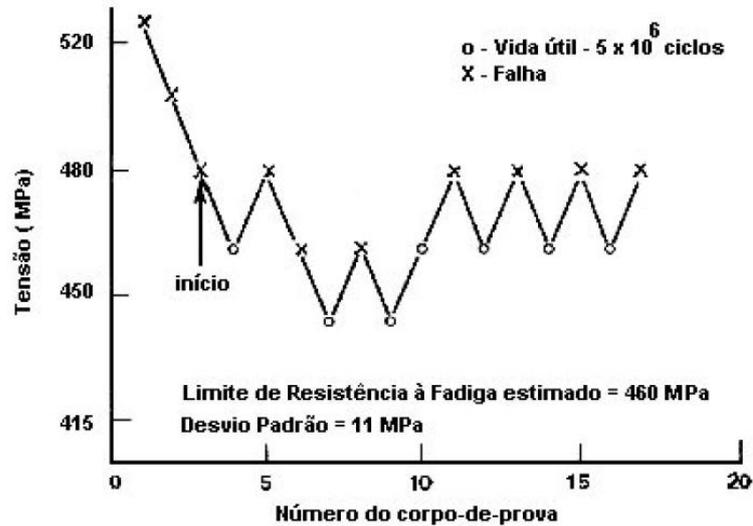


Figura 27 - Ensaio de fadiga Up-and-down para um aço 4340

Fonte: Collins (2006).

2.13.7 Método para levantamento das curvas utilizando as probabilidades S-N-P

Devido à dispersão nos resultados dos ensaios de fadiga, pode ocorrer uma considerável incerteza quanto à vida em fadiga e/ou limite de resistência. Esta dispersão é decorrente da variação de parâmetros, que incluem: fabricação dos corpos de prova e preparação da superfície, variáveis metalúrgicas, alinhamento dos corpos de prova no equipamento de ensaio, tensão média e a rotação do ensaio. Desta forma, é necessária a construção de uma família de curvas S-N, com probabilidade de falha (P) como parâmetro. Estas curvas são chamadas de curva de probabilidade constantes ou S-N-P.

A elaboração dessas curvas poderá ser realizada utilizando o método padrão ou o método da tensão constante, ambos já explicados.

Atualmente, pesquisadores estão trabalhando com modelos dinâmicos de probabilidades, em falhas de rodas de alumínio, utilizando modelos de elementos finitos (HSU, 2004). Com estes modelos é possível prever os limites de fadiga da antes da fabricação de um modelo físico.

2.13.8 Modelos estatísticos de regressão para dados de teste de vida acelerados

Um modelo estatístico é um conjunto de um ou mais modelos matemáticos, cuja finalidade é a modelagem de conjunto de dados que possuem um comportamento aleatório. Desta forma, um modelo estatístico tem dois componentes fundamentais: o conjunto de observações da variável de resposta e uma família de distribuição de probabilidade associada (CASTRO, 2009).

Quando realizados em condições normais de uso, os ensaios são muito demorados e caros. A forma mais rápida utilizada para obter informações que facilitam a predição da confiabilidade é a realização de ensaios acelerados. Os resultados são obtidos em altos níveis de tensão, ao que é desenvolvido um modelo estatístico-físico razoável para conseguir uma estimativa, por exemplo, do tempo médio ou mediano de vida, em condições de uso.

Este método permite encontrar modelos de regressão que descrevem o comportamento do tempo de falha, por meio de uma componente determinística e outra probabilística (MANSUR, 2003). A componente determinística (relação tensão-resposta) não é capaz de explicar a variabilidade de valores encontrados na variável resposta, para um mesmo nível de tensão.

O componente probabilístico é capaz de explicar a variabilidade dos tempos de falha das unidades em teste, em um mesmo nível de tensão.

Depois que os dados dos ensaios forem coletados, pode-se seguir a norma ASTM E739 (2010) para análise dos dados.

2.13.9 Modelo de regressão

A equação matemática que melhor descreve a relação de tensão (σ_a) e o número de ciclos até a falha (N) é a regressão linear (MALUF, 2002). As Equações que descrevem são as 2.9 e 2.10.

$$\text{Log}(N) = b_0 - b_1 \log(S) \quad (2.9)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i \quad (2.10)$$

Onde, Y_i é o logaritmo de N e X_i é o logaritmo da tensão.

Na equação, X_i é a variável independente, Y é a variável resposta, β_0 é o intercepto da linha de regressão com o eixo y , β_1 é o coeficiente de inclinação da reta ou coeficiente que mede o número de unidades em y , este coeficiente muda para cada unidade variável independente (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

Os modelos utilizados na análise de dados de confiabilidade são construídos para o logaritmo do tempo de falha T , $Y = Ln(T)$. Nesses modelos, supõe que Y tem uma distribuição de parâmetros de locação $\mu(x)$ e parâmetro de escala $T > 0$.

É utilizada a notação $\mu(x)$ para indicar que o parâmetro de locação da distribuição de Y , depende da variável de tensão (x), para o caso de fadiga à tensão alternada aplicada (σ_a).

$$Y = Ln(T) = \beta_0 + \beta_1 x + T\varepsilon \quad (2.11)$$

Nesse procedimento geral, pode ser considerado Y como log normal ou Weibull, no qual, T representa o tempo de falha, $\beta_0 = Ln(A)$ e $\beta_1 = W$, são parâmetros que dependem do material utilizado, do método de ensaio, geometria e característica dos corpos de prova. O T (parâmetro de escala), corresponde ao desvio padrão, constante para todos os níveis de tensão e ε é um valor aleatório, denominado de erro aleatório ou resíduo padronizado. Este último tem a distribuição que depende da variável X .

$$Y = \mu(x) + T\varepsilon \quad (2.12)$$

Na qual:

$$\mu(x) = \beta_0 + \beta_1 X \quad (2.13)$$

Nota-se que a equação representa um modelo de regressão linear simples, quando se supõe $Y = Ln(T)$, com distribuição normal (gaussiana), com média (parâmetro de locação) $\mu(x) = \beta_0 + \beta_1 X$ e variância (parâmetro de escala) T^2 .

2.13.10 Ajuste do modelo de regressão

Sendo $R(T) = P(T \geq t)$, a função de confiabilidade da log-normal a probabilidade do tempo até a falha, seja maior do que um tempo t determinado (FREITAS; COLOSIMO, 1997). As Equações que descrevem são 2.14 e 2.15.

$$R(T) = \Phi\left\{-\left[\frac{\ln(t)-\mu}{\Gamma}\right]\right\} \quad (2.14)$$

Na qual:

$$\mu = \beta_0 - \beta_1 X_0 \quad (2.15)$$

Desta forma:

$$R(T) = \Phi\left\{-\left[\frac{\ln(t)-\beta_0-\beta_1 X_0}{\Gamma}\right]\right\} \quad (2.16)$$

Na qual Φ é o percentil da distribuição normal padrão, com uma normal, média zero e desvio padrão log-normal igual a 1. Os parâmetros β_0 , β_1 e T são estimados pelo modelo, t é o tempo de vida de interesse e X_0 é o nível de tensão.

A partir da expressão, para $R(T)$ da log-normal, estabelece o cálculo inverso, como segue:

$$X_0 = \frac{1}{\beta_1} [\Phi^{-1}\Gamma + \ln(t) - \beta_0] \beta \quad (2.17)$$

Na qual Φ^{-1} é o valor de Z (normal), correspondente ao percentil de interesse.

O cálculo, para o limite de resistência à fadiga, é realizado utilizando o valor X_0 , para o qual tem $R(T) = 50\%$. Essa é a probabilidade se os corpos de prova vierem a falhar após um número de ciclos. Esta condição é usada para estimativas de cálculos diretos, utilizando a distribuição log-normal.

2.13.11 Adesão ao modelo

Para análise, utilizando regressão linear, deve-se assumir que os erros $E1$ e $E2$ satisfazem alguns pressupostos, como segue:

- Distribuição normal;
- Média dos resultados igual a zero;
- Variação σ^2 constante (homocedasticidade);
- Serem independentes.

Verificar as hipóteses é fundamental, porque toda a inferência estatística, no modelo de regressão linear, se baseia nestes pressupostos. Com esta condição, se houver violação dos mesmos, a utilização do modelo pode ser questionada.

Para a confirmação destes pressupostos, pode-se realizar a análise dos resíduos ou a determinação do R^2 .

Alguns autores, como Maluf (2002), recomendam a utilização da análise dos resíduos, porque consideram esta análise superior ao método do R^2 .

O resíduo é a diferença entre o valor observado e o valor estimado, dado pela equação de regressão linear estimada. O pressuposto de normalidade pode ser testado recorrendo ao teste de verificação de normalidade, como Lilliefors, ou de gráficos de probabilidade normal (*Normal Probability Plot*).

Existem dois tipos de gráficos de probabilidade normal, o primeiro representa a probabilidade acumulada, se a distribuição fosse normal e de acordo com a função da probabilidade analisada, acumulados erros (Normal P-P plot); e o segundo modelo determina o quartil de probabilidade dos resíduos, considerando uma distribuição normal.

Para realização do ensaio de fadiga será utilizado o método da tensão constante. Os resultados analisados serão verificados utilizando a análise de resíduos para verificar se os dados seguem uma distribuição normal. Confirmado a normalidade dos dados será utilizado o modelo de regressão para determinar as curvas S-N e S-N-P. A determinação do limite de fadiga será realizada utilizando o modelo encontrado na análise de regressão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para esta pesquisa, foi separado um lote de dez rodas produzidas com a liga AA413.1, no qual as peças foram fabricadas em condições normais. Para a análise, foi realizado um estudo com base no fluxograma da Figura 28.

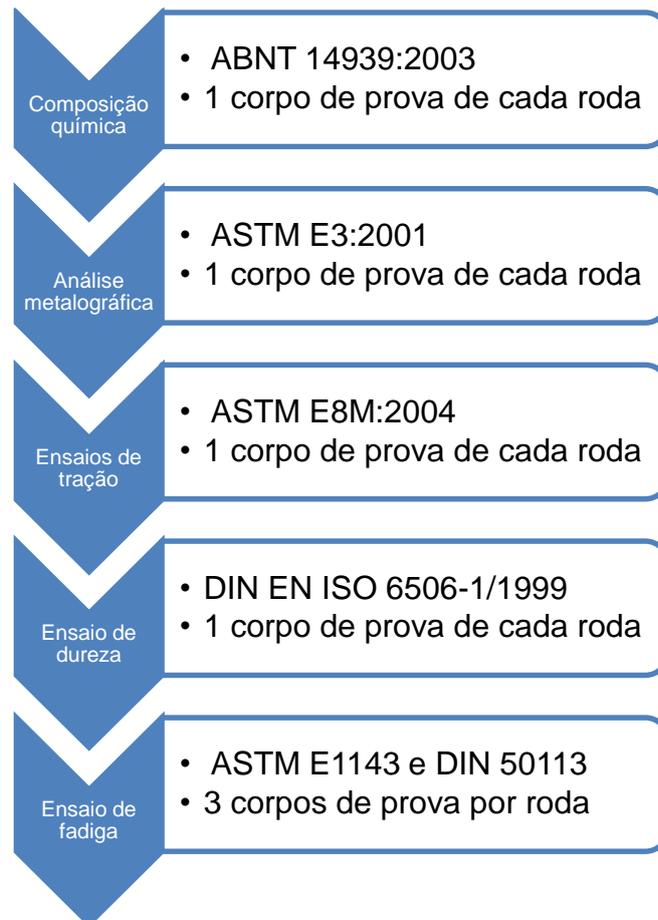


Figura 28 - Ensaio realizados para avaliar a resistência à fadiga de lote de rodas

Fonte: NBR 6752 (2013).

Uma roda pode ser dividida em três partes, sendo o aro responsável por fazer a ligação da roda com o pneu, enquanto o cubo faz a ligação da roda com o veículo. As aletas são responsáveis por fazer a ligação entre o veículo (cubo) e a pista (pneu). Para este estudo serão utilizadas somente as aletas, porque fazem parte da região mais solicitada no projeto de uma roda, como foi apresentado na Figura 16. A Figura 29 apresenta as três partes principais de uma roda.

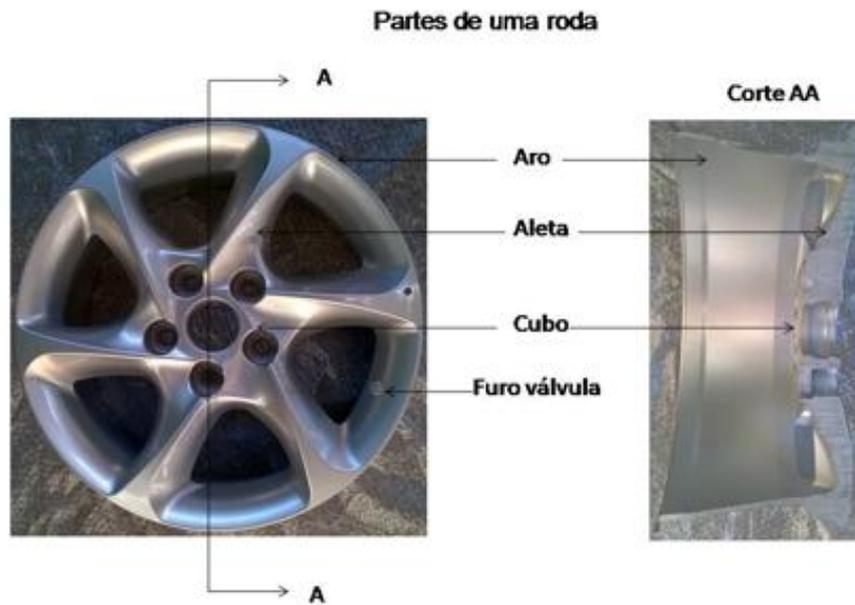


Figura 29 - Modelo de uma roda e suas partes de fabricação

Para análise da peça, foram retirados corpos de prova das aletas, de acordo com o apresentado na Figura 30. Para minimizar a possibilidade de variação ocorrida no processo de solidificação, todas as peças foram fundidas em sequência, e com o mesmo molde de fabricação.



Sentido de retirada dos corpos de prova tendo como referência o furo de válvula

Figura 30 - Posição de retirada dos corpos de prova

3.1 Composição química

De cada roda foi retirado um corpo de prova para análise química por espectrometria de emissão ótica, realizada no laboratório da empresa Mangels Industrial S.A., conforme Figura 31. As amostras retiradas das rodas foram fresadas nas duas faces antes da análise química. Os resultados apresentados correspondem à média de três análises por corpo de prova. Estes resultados são considerados aproximados, pois a análise foi realizada em amostras retiradas diretamente das rodas. Para evitar o efeito do resfriamento lateral das aletas, todas as amostras foram retiradas da região central do perfil, conforme Figura 32.



Figura 31 - Espectrômetro de emissão ótica

Fonte: Foto tirada pelo autor na empresa Mangels Industrial S.A.



Figura 32 - Local de retirada do corpo de prova para análise química

3.2 Caracterização metalográfica das peças

As amostras para análise foram retiradas da região central das aletas, conforme Figura 32. A análise da morfologia foi realizada conforme norma ASTM E3 (2001). As amostras foram selecionadas por meio de disco diamantado na cortadeira Discotom, e embutidas em

resina de poliéster (baquelite), para facilitar o processo de lixamento e polimento. As amostras foram lixadas seguindo uma sequência de lixas de carbonetos de silício, com granulometria 320, 400, 600 e 1000 mesh. Na sequência, foram polidas com panos struers DP-MOL e pasta de diamante de 5 e 2 μm , lubrificada com álcool etílico absoluto. Para finalizar, a peça foi polida com pano de polimento Arotec 3 μm , lubrificado com solução KOH, sílica coloidal e água.

A microestrutura foi observada em microscópio ótico Zeiss, Figura 33. Este microscópio utiliza uma câmera para aquisição de imagem, e programa para análise de imagem Olympos Soft Imagem Solution.



Figura 33 - Microscópio Ótico Zeiss

Fonte: Foto tirada pelo autor no laboratório da UNIFEI

3.3 Espaçamento interdendrítico

O método utilizado para as medições dos espaçamentos dendríticos secundários (λ_2) ou SDAS (*Secondary Dentrite Arm Spacing*) está esquematizado na Figura 34.

A determinação da SDAS é calculada pela equação 3.1:

$$\lambda_2 = L/(n-1) \quad (3.1)$$

Esse método é baseado em calcular o valor de λ_2 pela média das distâncias entre os braços secundários, ramificações secundárias e sobre a seção longitudinal (paralela à direção de crescimento) de uma ramificação dendrítica primária, em que “n” é o número de braços secundários interceptados pelo comprimento L. As medidas foram realizadas de maneira

sistemática e repetitiva, padronizando todas as medições. Para todas as posições (distâncias a partir do centro das aletas) foram realizadas um total de dez medições, das quais foi extraído um valor médio.

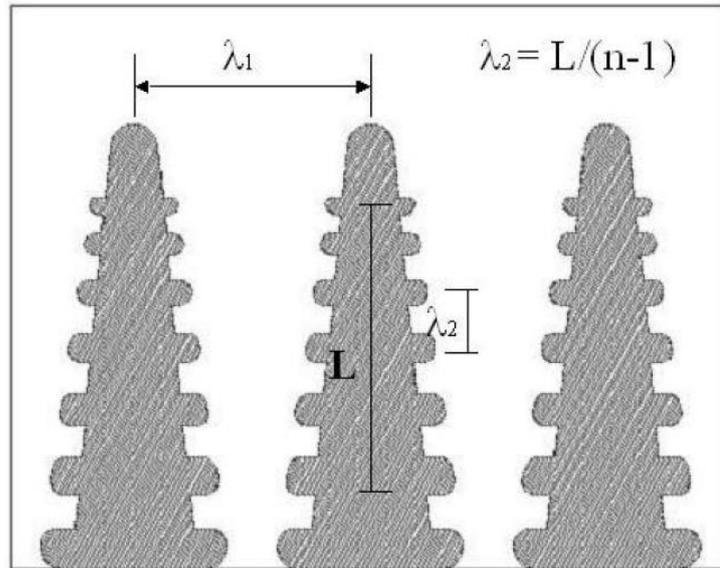


Figura 34 - Representação esquemática da SDAS bidimensionais

Fonte: Adaptado de Vita Mateso (2006).

3.4 Verificação do nível de porosidade

A análise no nível de porosidade foi realizada com o software Olympus Soft Imagem Solution. A medição é realizada por diferença de tonalidade para cada imagem. Foi realizado 10 medições em cada amostra.

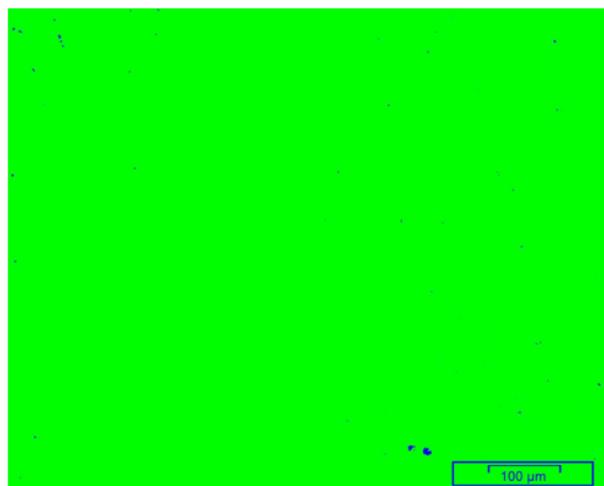


Figura 35 – Imagem do nível de porosidade de cada amostra

Fonte: Software Olympus Soft Imagem Solution

3.5 Ensaio de tração

Foi retirado de cada peça um corpo de prova para tração, conforme demonstrado na Figura 36:



Figura 36 - Local de retirada dos corpos de prova

Os ensaios de tração foram realizados no laboratório da UNIFEI, em temperatura ambiente, segundo a norma ASTM E8M-04 (2008). O limite de escoamento (LE) e o limite de resistência à tração (LRT) foram determinados no equipamento Mechanical Test System (MTS), modelo 201, à temperatura ambiente e taxa de deformação constante de 0.02 mm/mm.s, de acordo com a norma ASTM E8M (2008). As dimensões dos corpos de prova foram realizadas conforme a norma DIN50125 (2009).

O desenho e foto do corpo de prova são mostrados nas Figuras 37 e 38, respectivamente.

Os valores de carga e deslocamento foram dinamicamente registrados por um computador acoplado ao sistema.

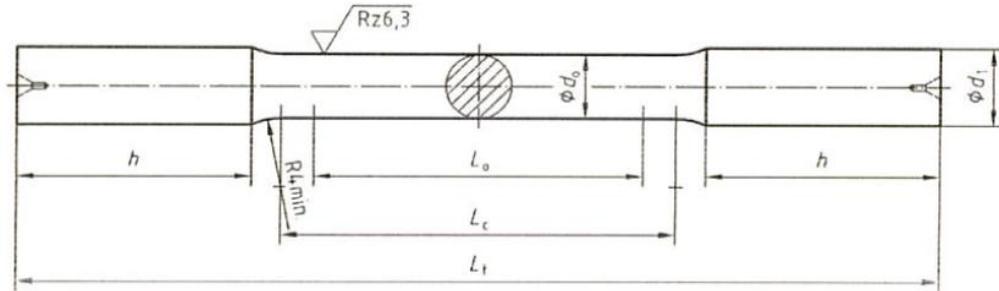


Figura 37 - Corpo de prova para ensaio de tração conforme norma
Fonte: DIN 50125 (2009).



Figura 38 - Modelo do corpo de prova utilizada

As dimensões dos corpos de prova estão na Tabela 4. Estas dimensões atende a norma NBR 6752-2013

Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova conforme norma DIN 50125

d_0	L_0	d_1	h	L_c	L_t
		≈	min.	min.	min
6	30	8	25	36	95

Fonte: DIN 50125 (2009).

3.6 Ensaio de dureza Brinell

O ensaio foi realizado ao longo da superfície, de onde seriam retirados os corpos de prova. Foram realizadas três medições de cada peça, conforme norma DIN EN ISO 6506-

1/1999. A medição de dureza foi realizada em um equipamento Pantec, modelo 2100. Esse equipamento conta com um penetrador de geometria esférica, de 5 mm. Os corpos de prova foram retirados da região central das aletas e depois frezados e lixados nas duas faces, conforme Figura 39. As amostras foram lixadas seguindo uma sequência de lixas de carbonetos de silício, com granulometria 120, 180, 400 e 600 mesh, sendo os valores considerados pela média de três medições para cada amostra disponibilizada.



Figura 39 - Vista em corte de uma roda para análise de dureza

3.7 Ensaio de fadiga

O ensaio da fadiga foi realizado conforme normas:

- ASTM 1143 (2010) *Rotating Bar Bending Fatigue Testing*.
- DIN 50113 (1982) Ensaio de flexão rotativa.

Este ensaio foi realizado em regime de alto ciclo, ao que o corpo de prova foi fixado em uma extremidade com momento fletor, variando ao longo do comprimento do corpo de prova. Para realização do ensaio foi utilizado uma máquina RBF200 (Figura 36) com razão de carga $R = -1$ e frequência de 100 Hz, à temperatura ambiente, disponível no laboratório da UNIFEI.

A geometria dos corpos de prova foi realizada conforme recomendado pelo manual da máquina, mas foram produzidos conforme norma ASTM 1143 e DIN 1605 (1982), apresentado na Figura 40. De cada roda foram retirados quatro corpos de prova da região central das aletas e usinados em torno CNC, lixados e polidos longitudinalmente, seguindo os

procedimentos da norma ISO 1143 (2010). Dessa forma, não apresentaram defeitos superficiais, que poderiam criar efeitos indesejáveis na etapa inicial de trinca do ensaio de fadiga. Foram preparados quarenta corpos de prova e selecionados os trinta que apresentavam menor rugosidade, como especificado na norma ISO 1143. A quantidade de corpo de prova foi determinada conforme as normas GMN 7152 (2002) e ASTM E739 (2010).

Os corpos de prova foram usinados utilizando em um torno CNC, para garantir a medida. Todos os corpos de prova foram submetidos ao mesmo procedimento de fabricação.



Figura 40 - Corpo de prova utilizado para teste de fadiga

A medição dos corpos de prova foi realizada com micrômetro Mitutoyo, modelo BMD25. Para realização da medição, os corpos de prova ficaram 24 horas em sala climatizada, a 20 ± 2 °C, conforme procedimento de calibração, como apresentado na Figura 41.

Para chegar à dimensão final, os corpos de prova foram retificados após o processo de usinagem.



Figura 41 - Suporte para fixação do corpo de prova para medição utilizando o micrômetro

A Rugosidade foi medida com um rugosímetro marca Mahr, modelo M1, conforme Figura 42.



Figura 42 - Medição da rugosidade superficial

A norma ISO 1143 (2010) cita ser: “(...) preferível, qualquer que seja a condição de ensaio, para especificar uma rugosidade média da superfície, Rz de menos de $0,2 \mu\text{m}$ (ou equivalente).”.

O modelo do corpo de prova utilizado foi conforme norma ISO 1143 (2010) página 14. A rugosidade especificada é de $0,32 \text{ Ra}$. No caso acima, Rz não é rugosidade média e sim rugosidade de pico a vale. Por outro lado, durante o processo de polimento, alguns corpos de provas apresentaram riscos circunferenciais originados durante o processo de lixamento, não sendo possível a sua eliminação.

3.7.1 Metodologia utilizada para ensaio de fadiga

Os corpos de prova foram ensaiados na máquina de fadiga flexo rotativa, verificando o número de ciclos necessários para ocorrer a sua ruptura, conforme Figura 43. Foi considerado como vida infinita o corpo de prova que atingisse 10^7 ciclos, mas os ensaios foram finalizados quando os corpos de provas completavam 5×10^7 ciclos. A tensão aplicada começou com 122 MPa, sendo reduzida gradativamente de acordo com a escala da máquina, não sendo possível testar valores intermediários. A tensão aplicada está diretamente ligada ao movimento do peso na escala e ao diâmetro do corpo de prova. Os valores de tensão máxima possíveis de serem ajustados no equipamento são: 122 MPa; 113 MPa; 105 MPa; 97 MPa; 80 MPa e 62,7 MPa.



Figura 43 - Equipamento utilizado para realização dos ensaios de fadiga

A Figura 44 apresenta um esquema de aplicação de carga na máquina de ensaio de fadiga flexorotativa.

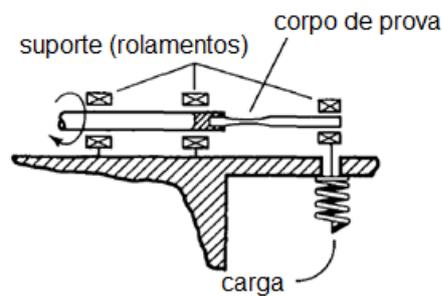


Figura 44 - Representação esquemática das condições de teste e aplicação de carga

Fonte: SOUZA (1982).

O cálculo do momento é realizado utilizando a Equação 3.2:

$$M = \frac{\pi \cdot s \cdot d^3}{32} \quad (3.2)$$

Sendo:

M : Definição para momento.

S : Nível máximo de tensão aplicada na região de mínimo diâmetro do corpo de prova.

d : Menor diâmetro do corpo de prova.

Por meio desta equação é possível relacionar as tensões, devido ao momento fletor interno, com a força aplicada que causa esse momento e os esforços cortantes atuantes.

Sabendo-se que as máximas tensões normais (σ) devem-se à flexão, estas podem ser encontradas utilizando a Equação 3.2.

3.7.2 Curva S-N

Considerando o número de resultados válidos (30 corpos de prova), a norma ASTM E 739-91 pode ser utilizada, uma vez que esta norma considera tal quantidade válida para “pesquisa e desenvolvimento de testes de componentes e espécimes” (6 a 12 CPs), com um percentual de replicação obtido por meio da equação abaixo. Para este cálculo, utilizou-se o número de níveis de tensões $i=7$ e o número de ensaios $n=30$. A Equação que descreve é a 3.3.

$$Pr = 100 * \left(1 - \left(\frac{l}{N}\right)\right) \quad (3.3)$$

O resultado obtido da aplicação da fórmula deve estar dentro do previsto na norma (50 a 75 %).

3.7.3 Planejamento dos ensaios para o levantamento da curva S-N-P

O plano experimental escolhido para a realização dos ensaios foi o Plano de Compromisso (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

O nível alto é escolhido por considerações práticas. Os níveis intermediários e baixo são escolhidos para minimizar a variância assintótica do estimador 100P %, relativo ao percentil da distribuição do tempo de vida útil do corpo de prova.

O levantamento tradicional da curva S-N-P apresenta uma desvantagem em relação ao Plano de Compromisso. Essa desvantagem se deve ao fato dele usar o mesmo número de corpo de prova em todos os níveis de tensão (MANSUR, 2003). Quando se utiliza níveis mais baixos de tensão, a probabilidade de ocorrer uma falha é bem menor. Isto faz com que a precisão dos valores obtidos nos níveis mais baixos seja menor. Ao aumentar o número de corpos de prova nos níveis mais baixos, contribui-se para uma estimativa mais precisa do resultado.

No presente trabalho, foram utilizados oito níveis de tensões determinados de acordo com a escala da máquina, não sendo possível testar valores intermediários, condição que reduziria a incerteza para níveis mais baixos.

Neste estudo levantaram-se as curvas S-N-P para os ambientes propostos no trabalho. Em tais curvas são apresentadas três probabilidades de falha distintas, 1 %, 50 % e 99 %, utilizando a distribuição log-normal.

3.7.4 Determinação do limite de resistência à fadiga (S_e)

Para a determinação do limite de resistência à fadiga, utilizaram-se:

- O levantamento das curvas S-N-P para os ambientes em estudo;
- O modelo de regressão para dados oriundos de testes de vida acelerados, empregado em estudos de confiabilidade.

4 RESULTADOS

4.1 Composição química

Com as amostras de alumínio AA4313.1 retiradas das rodas foi realizado a análise da composição química, utilizando o método de espectrometria óptica, conforme é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5- Resultado da composição química

Ro da	Si	Mg	Fe	Zn	Mn	Ni	Sn	Ti	Cr	V	B	Ca	Zr	Sr	P	Al-%
	11 - 13	Máx. 0,10	Máx. 1,0	Máx. 0,40	Máx. 0,35	Máx. 0,50	Máx. 0,15	Máx. 0,20	Máx. 0,05							
1	11.604	0.088	0.107	0.004	0.002	0.005	0.000	0.126	0.001	0.013	0.007	0.0011	0.001	0.018	0.0006	88.02
2	11.295	0.143	0.180	0.004	0.003	0.007	0.000	0.120	0.001	0.013	0.007	0.0010	0.001	0.022	0.0006	82.20
3	11.473	0.119	0.140	0.003	0.003	0.006	0.000	0.133	0.001	0.013	0.010	0.0010	0.001	0.019	0.0006	88.08
4	12.063	0.096	0.124	0.003	0.003	0.005	0.000	0.113	0.001	0.013	0.004	0.0007	0.001	0.016	0.0006	87.56
5	11.602	0.154	0.198	0.004	0.003	0.007	0.000	0.112	0.001	0.013	0.004	0.0014	0.001	0.019	0.0006	87.88
6	11.268	0.107	0.155	0.004	0.003	0.005	0.000	0.111	0.001	0.013	0.004	0.0008	0.001	0.017	0.0006	88.31
7	11.518	0.130	0.161	0.003	0.003	0.006	0.000	0.117	0.001	0.013	0.005	0.0010	0.001	0.018	0.0006	88.02
8	11.550	0.116	0.141	0.004	0.003	0.006	0.000	0.110	0.001	0.013	0.003	0.0009	0.001	0.017	0.0006	88.03
9	11.623	0.110	0.146	0.002	0.003	0.005	0.000	0.109	0.001	0.013	0.004	0.0008	0.001	0.017	0.0006	87.96
10	11.594	0.105	0.114	0.003	0.003	0.006	0.000	0.130	0.001	0.013	0.007	0.0012	0.001	0.018	0.0006	88.00

Os valores encontrados na composição química estão dentro do intervalo que caracteriza a liga AA431.1. Todos os resultados estão em conformidade com a NBR 6752 (2013).

4.2 Microestrutura

As amostras mostraram uma microestrutura típica do alumínio AA413.1.

A maior parte da microestrutura se apresenta com bom grau de tratamento de modificação (partículas de silício com morfologia em fibras ou bastonetes), embora seja evidente o engrossamento da microestrutura nos contornos de células eutéticas, conforme pode ser observado nas Figuras 44 e 45. Com esta morfologia, a microestrutura está aprovada e classificada como nível 2 no padrão ASTM. Este padrão está disponível na Figura 17.

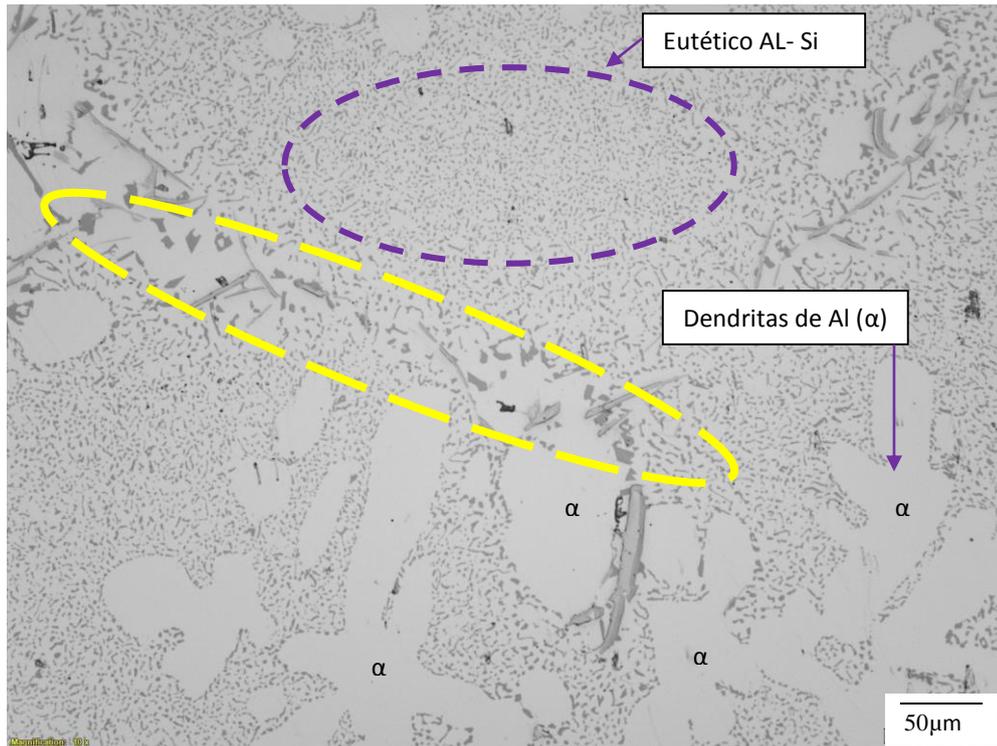


Figura 45 - Microestrutura dos corpos de prova utilizados para ensaio de fadiga

Microestruturas com partículas de Si finas no centro da célula eutética e grossa nos contornos. Pode-se observar uma concentração de partículas alongadas ricas em Fe (AlFeSiMg) nos contornos de grão.

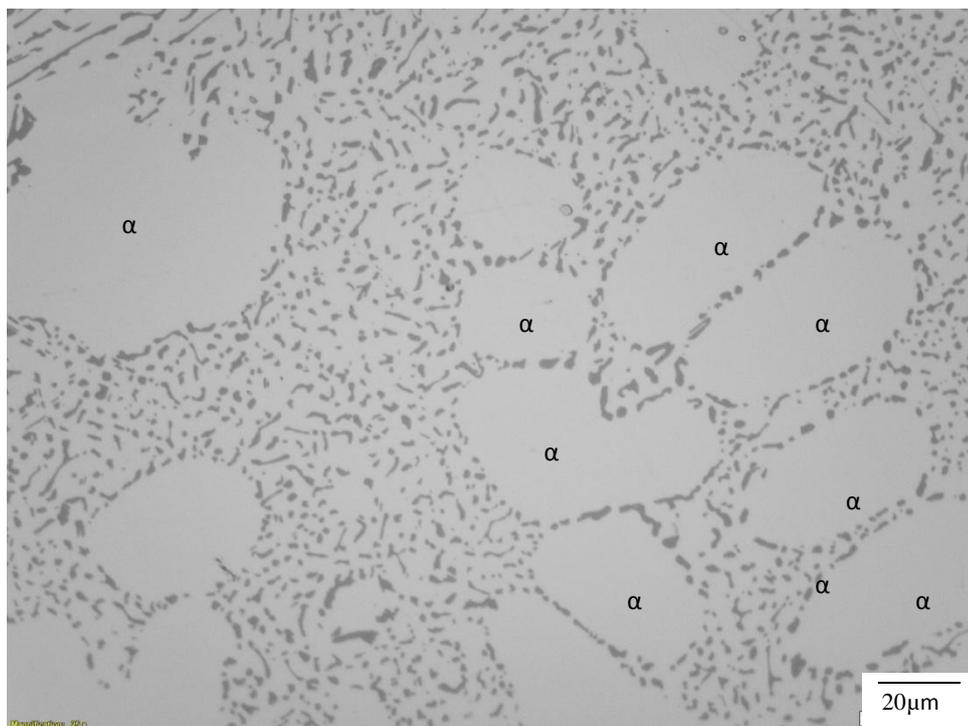


Figura 46 - Microestrutura dos corpos de prova utilizados para ensaio de fadiga ampliada

Todas as amostras empregadas na análise da microestrutura foram retiradas da região central das aletas para evitar possíveis efeitos do resfriamento mais acentuado, conforme demonstrado na Figura 47.



Figura 47 - Local de retirada dos corpos de provas

4.3 Espaçamento interdendrítico

As propriedades mecânicas das ligas de alumínio são fortemente influenciadas pelo espaçamento interdendrítico.

Tabela 56 - Resultado do espaçamento interdendrítico

Roda	Espaçamento [μm]
1	33 ± 4
2	34 ± 3
3	39 ± 5
4	31 ± 5
5	25 ± 4
6	33 ± 5
7	32 ± 8
8	31 ± 3
9	35 ± 5
10	33 ± 5
Média	33 ± 4

Os valores apresentados na tabela 6 é a média de dez medições realizadas por roda.

As normas para fabricação de rodas não especifica valores para o SDAS (λ_2). Foi encontrada uma referência para a liga A356 em um trabalho realizado por ZHANG, 2010 sobre rodas de liga leve que apresentava resultados de SDAS (λ_2). Nove dos dez resultados obtidos neste lote de rodas apresentaram-se abaixo dos valores mencionados neste trabalho.

4.4 Porosidade por área

O resultado da Tabela 6 é a média de dez medições realizadas na amostra retirada de cada roda. A norma NBR6752 (2013) não cita limites máximos de percentual de porosidade por área, os resultados podem ser observados nos valores da Tabela 76.

Tabela 6 7- Resultado da Porosidade por área

Roda	Percentual de Porosidade (%)
1	1,7 ± 0,2
2	1,5 ± 0,2
3	1,9 ± 0,2
4	1,5 ± 0,2
5	0,7 ± 0,1
6	1,2 ± 0,3
7	0,9 ± 0,2
8	0,9 ± 0,2
9	1,0 ± 0,2
10	0,9 ± 0,1
Média	1,22 ± 0,4

Ressalta-se que a porosidade tem grande influência no limite de resistência à fadiga dos materiais. No trabalho realizado por Mayer *et al.* (2003), conclui-se que em 98,5 % dos corpos de provas testados, a trinca iniciou-se na porosidade. Apesar de estas amostras apresentarem este nível de porosidade todas as rodas estão aprovadas nos ensaios de fadiga e propriedades mecânicas realizado no produto. A norma NBR 6752-2013 não especifica limites para o nível de porosidade das rodas.

4.5 Corpos de prova para fadiga

Os resultados das medições (A, B e C) do diâmetro para cada amostra podem ser vistos na Tabela 78. Para cada corpo de prova foi realizado a medição nas extremidades e no centro.

Tabela 78 - Dimensional dos corpos de prova

RODA	AMOSTRA	A	B	C	RODA	AMOSTRA	A	B	C
1	1	11,52	5,21	11,53	6	1	11,55	5,22	11,54
	2	11,55	5,23	11,54		2	11,55	5,23	11,52
	3	11,53	5,22	11,54		3	11,53	5,24	11,56
2	1	11,53	5,25	11,54	7	1	11,56	5,22	11,57
	2	11,54	5,23	11,53		2	11,55	5,24	11,56
	3	11,53	5,22	11,54		4	11,53	5,23	11,52
3	1	11,54	5,24	11,52	8	1	11,56	5,23	11,53
	2	11,54	5,22	11,53		2	11,56	5,23	11,55
	3	11,54	5,24	11,55		3	11,55	5,25	11,54
4	1	11,55	5,21	11,54	9	1	11,55	5,24	11,54
	2	11,54	5,22	11,55		2	11,56	5,25	11,55
	4	11,53	5,23	11,52		3	11,55	5,23	11,53
5	1	11,54	5,25	11,53	10	1	11,55	5,24	11,53
	2	11,54	5,22	11,53		2	11,53	5,23	11,55
	3	11,53	5,25	11,54		3	11,52	5,23	11,54
MÍNIMO		11,52	5,21	11,52					
MÉDIA		11,54	5,23	11,54					
MÁXIMO		11,56	5,25	11,57					
DESVIO PADRÃO		0,02	0,02	0,02					

4.6 Rugosidade nos corpos de prova utilizados para fadiga

O conhecimento da rugosidade tem como objetivo avaliar as condições superficiais das amostras do corpo de prova, conforme Tabela 98.

Os valores de rugosidade encontrados estão de acordo com a norma ISO 1143(2010) previsto para o modelo de corpo de prova da página 14 da norma.

Tabela 89 - Rugosidade dos corpos de prova

RODA	AMOSTRA	Rugosidade Longitudinal (RA)	RODA	AMOSTRA	Rugosidade Longitudinal (RA)
	1	0,16		1	0,13
1	2	0,15	6	2	0,12
	3	0,19		3	0,19
	1	0,14		1	0,16
2	2	0,19	7	2	0,19
	3	0,20		4	0,12
	1	0,20		1	0,19
3	2	0,18	8	2	0,19
	3	0,19		3	0,17
	1	0,19		1	0,16
4	2	0,16	9	2	0,14
	4	0,16		3	0,19
	1	0,15		1	0,19
5	2	0,19	10	2	0,18
	3	0,20		3	0,20
	MÍNIMO	0,12			
	MÉDIA	0,17			
	MÁXIMO	0,20			
	DESVIO PADRÃO	0,05			

4.7 Ensaio de tração

Os resultados obtidos nos ensaios de tração do alumínio AA413.1, estão demonstrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado de ensaios de tração

Corpo de prova	Limite de resistência do material (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Along. na rupt. com ext. (%)
1	168,72	80,19	3,68
2	161,24	79,09	3,61
3	161,14	77,35	3,53
4	160,95	73,78	3,47
5	165,61	79,49	3,76
6	161,44	74,95	3,46
7	167,29	79,28	3,58
8	170,70	85,42	3,90
9	173,34	84,22	3,84
10	158,00	81,27	3,62
Média	164,84 ± 5	79,50 ± 4	3,64 ± 0.14

4.8 Ensaio de dureza

Os resultados de dureza estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado de ensaios de dureza

Peça	Resultados HB (5/250)
1	56
2	58
3	60
4	60
5	58
6	58
7	57
8	59
9	58
10	56
Média	58 ± 1.41

Observa-se que houve variação pequena no desvio padrão entre os valores medidos. Estes valores estão dentro do especificado para rodas, conforme a NBR 6752 (2013). De acordo com esta norma, o valor mínimo permitido é de 50HB.

4.9 Curva S-N do alumínio AA413.1

Para levantamentos da curva foram utilizados oito níveis de tensão, não sendo permitido testar em intervalos menores, devido à restrição da escala da máquina.

Conforme já mencionado, as tensões utilizadas foram 63, 71, 80, 88, 97, 105, 113, 122 MPa. Os resultados obtidos nos ensaios, quanto ao número de ciclos até a fratura em função da tensão máxima aplicada, encontram-se na Tabela 12.

Observa-se uma dispersão considerável nos dados de fadiga, isto é, uma variação do valor do número de ciclos medidos para vários corpos de prova ensaiados sob a mesma tensão.

Para a verificação dos números de corpo de prova, foi utilizado o número de níveis de tensões $i=8$ e o número de ensaios $n=30$, que segundo a Equação 4.1, o valor obtido foi de 73 %.

$$Pr = 100 * \left(1 - \left(\frac{I}{N}\right)\right) = 73 \% \quad (4.1)$$

O resultado obtido da aplicação da fórmula encontra-se dentro do previsto na norma ASTM 739 (50 % a 75 %).

Tabela 12 - Tensão e números de ciclos

Tensão (MPa)	Nº ciclos (rompidos)
122	2400
122	1800
122	3100
113	97451
113	109900
113	101800
113	89900
105	485100
105	53300
105	21500
97	1024100
97	426700
97	3238800
97	216700
88	109854
88	485000
88	2458435
88	5428635
80	2502200
80	3792800
80	28089500
80	9968100
71	28189423
71	12565200
71	42852456
71	51728352
63	50724000
63	51229000
63	52.742800

A representação gráfica da curva S-N para os ensaios de fadiga flexo rotativa realizados é apresentada na Figura 49. Conforme esperado, a dispersão de resultados foi maior para valores menores de tensão máxima.

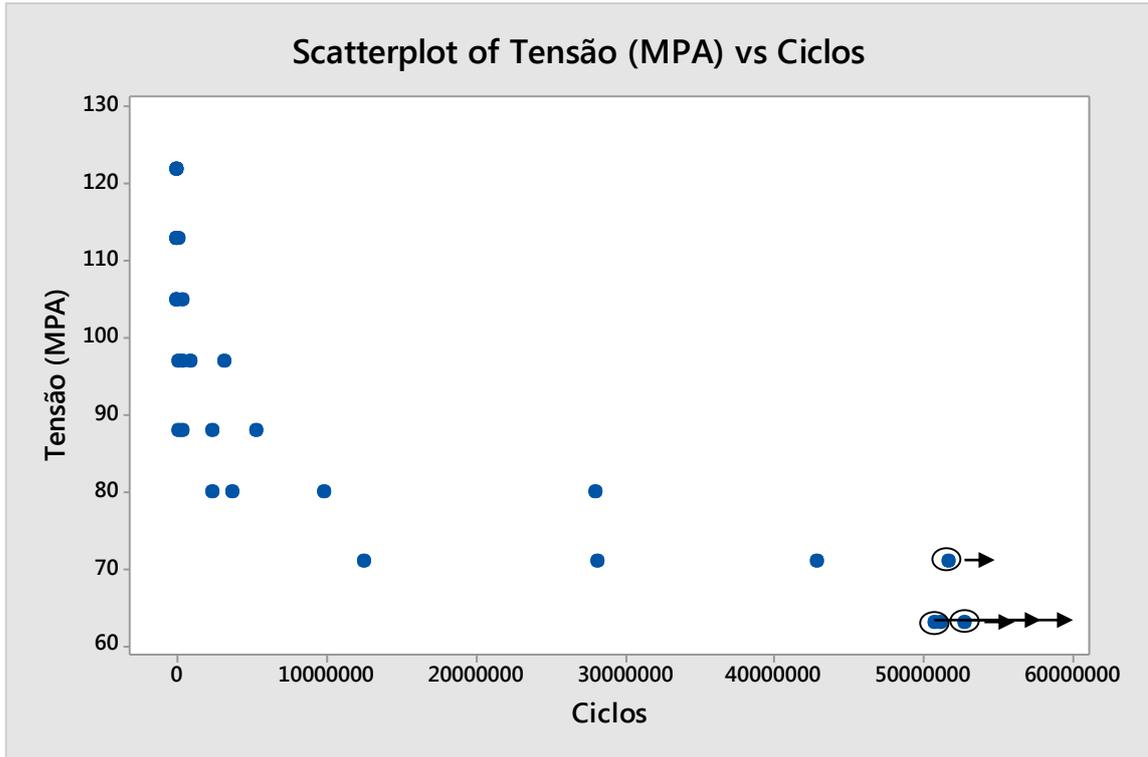


Figura 49 - Tensão x número de ciclos

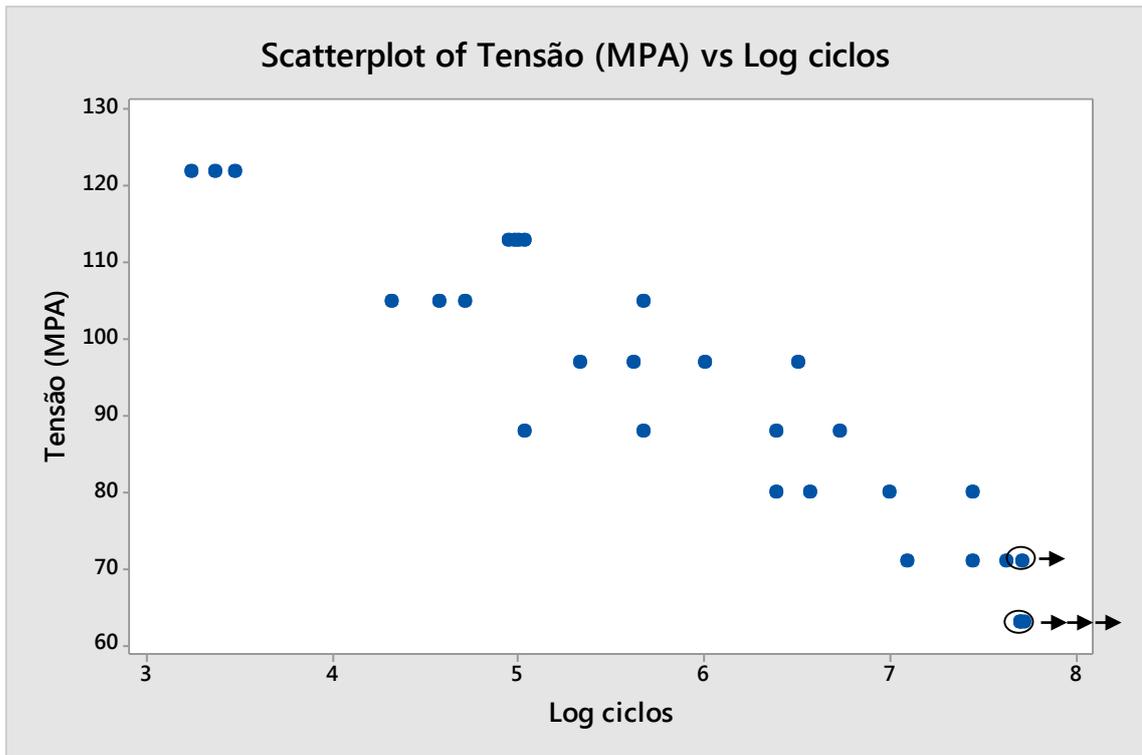


Figura 50 - Tensão x log. número de ciclos

4.9.1 Ajuste do modelo de regressão

A validação dos resultados foi realizada utilizando a verificação do ajuste do modelo de regressão. A distribuição estatística aplicada foi a log-normal.

A estimativa dos parâmetros desse modelo e a verificação dos mesmos foram realizadas utilizando o software MINITAB, versão 17. Na Figura 51 são representados os valores dos resíduos padronizados e, em seguida, os valores das variáveis, que estão na Tabela 12.

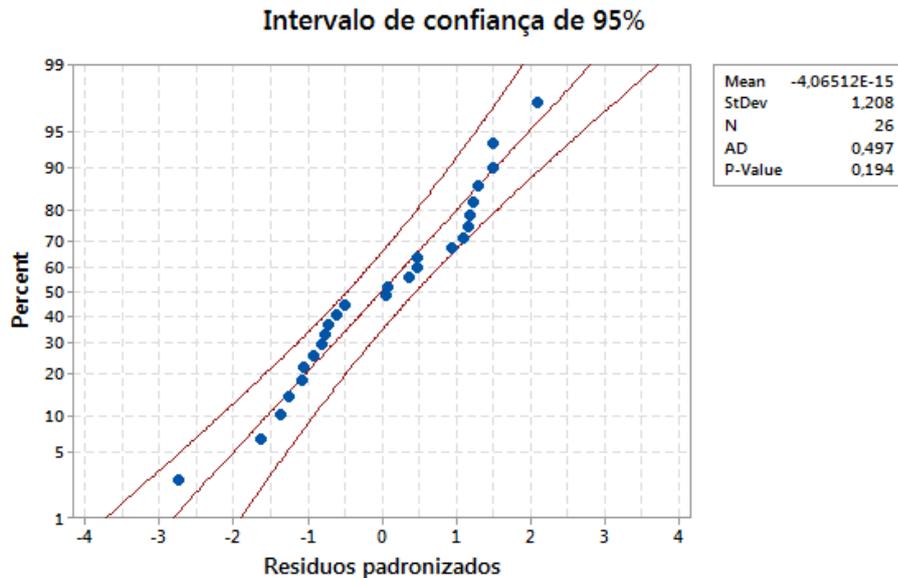


Figura 51 - Probabilidade dos resíduos padronizados

Os resultados obtidos pelo gráfico foram analisados conforme demonstrado na Tabela13:

Tabela 13 – Resultados obtidos pela análise do software MINITAB

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	174,41	174,406	114,65	0,000
Tensão (MPa)	1	174,41	174,406	114,65	0,000
Error	24	36,51	1,521		
Lack-of-Fit	5	13,36	2,672	2,19	0,098
Pure Error	19	23,15	1,218		
Total	25	210,92			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,23339	82,69%	81,97%	80,10%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	28,59	1,48	19,32	0,000	
Tensão (MPa)	-0,1618	0,0151	-10,71	0,000	1,00

Com base nesta análise foram encontrados os seguintes resultados:

- Intercepto: 28,59
- Coeficiente da variável preditora: -0,1618
- Parâmetro de escala da distribuição log-normal: 1,23339

O modelo obtido com base nos dados está apresentado na Equação 4.2.

$$Y = \ln(T) = 28,59 - 0,1618x + 1,23339\varepsilon \quad (4.2)$$

Na qual, T tem uma distribuição log-normal com parâmetros $\mu(x)$ (que dependem do valor de $x =$ nível de tensão), e $\Gamma = 1,23339$.

A análise estatística dos resultados indica que o valor dos resíduos (valores ajustados – valores observados) aproxima-se de uma reta. Tais valores estão dentro da faixa de 95 % de confiança e sem nenhuma configuração que demonstre comportamento insatisfatório, ou seja, o modelo em questão é adequado para este estudo, conforme demonstrado na Figura 50.

4.10 Determinação das curvas S-N-P para o alumínio AA413.1

Para a determinação das curvas S-N-P do alumínio AA413.1, são consideradas as probabilidades de falhas distintas, que no caso deste trabalho foram de 1 %, 50 % e 99 %. Os levantamentos destas curvas foram feitos utilizando-se a distribuição log-normal, conforme apresentado na Figura 52.

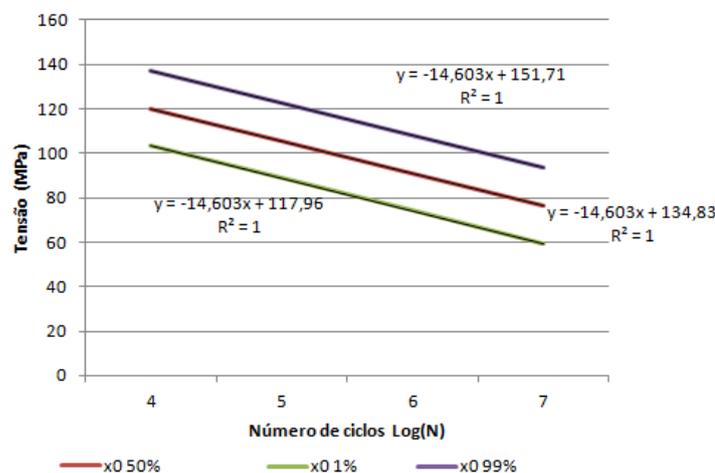


Figura 52 - Curva S-N com os intervalos de confiança de 1 %, 50 % e 99 % para o alumínio AA413.1

Para o levantamento da curva S-N foram testados 30 corpos de prova, sendo quatro deles censurados, pois o ensaio superou a quantidade de 50.000.000 de ciclos.

Os parâmetros do coeficiente linear da reta, coeficiente angular, coeficiente de determinação, o qui-quadrado e o intervalo de confiança obtidos nos ajustes das equações das curvas S-N-P, para os ensaios de fadiga flexo rotativa, estão mostrados na Tabela 14. Estes parâmetros foram determinados utilizando os softwares MINITAB e Microsoft Excel.

Tabela 14 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga

Parâmetro	Percentuais para ensaios		
	1 %	50 %	99 %
A	117,96	134,83	151,71
B	-14,63	-14,63	-14,63
Coeficiente de Determinação (R²)	1	1	1
Intervalo de Confiança	0,95	0,95	0,95

Com esses dados é possível calcular os parâmetros obtidos pelas retas, utilizando as equações 4.3 e 4.4.

$$\sigma_a = a + b \times \log[N] \quad (4.3)$$

Com:

$$N = 10^{\frac{\sigma_a - a}{b}} \quad (4.4)$$

Nestas equações, a é o coeficiente linear da reta, ou seja, é o parâmetro que determina a interseção da curva com o eixo das ordenadas (eixo das tensões); b é o coeficiente angular ou declividade da curva, ou seja: a tangente do ângulo formado pela reta e a parte positiva do eixo das abscissas (número de ciclos). Como o ângulo é obtuso ($90^\circ < \alpha < 180^\circ$), a tangente é negativa (MANSUR, 2003).

4.10.1 Cálculo do limite de resistência à fadiga pelo modelo de regressão

Com os dados experimentais obtidos pelo levantamento da curva S-N-P foi possível calcular o limite de resistência à fadiga, utilizando o modelo de regressão. Com estes valores,

Juntamente com a função de confiabilidade da distribuição Log-normal e o cálculo do inverso, determina-se o valor de x_0 .

Com os valores obtidos nos ajustes das curvas S-N-P para ensaios do alumínio AA413.1, quais sejam: $\beta_0 = 28,59$, $\beta_1 = -0,1618$, $\Gamma = 0,497$ e $\phi^{-1} = 0$. A Equação 4.5 torna-se:

$$x_0 = \frac{1}{-0,1618} [0 \times 0,497 + \ln(1 \times 10^6) - 28,59] = 91,31 \text{ MPa} \quad (4.5)$$

O limite de resistência à fadiga é o valor x_0 , para o qual se tem $R(T) = 50\%$, ou seja, a probabilidade de falha dos corpos de prova após 1.000.000 de ciclos é de 50 %.

Utilizando a equação 4.5, foi calculado o limite de resistência à fadiga para 10.000.000 ciclos e 50.000.000 ciclos conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Limites de resistência a fadiga

Ciclos	Limite de resistência à fadiga
1.000.000	91 MPa
10.000.000	77MPa
50.000.000	67 MPa

De acordo com estes resultados, o projeto de rodas que utilize valores menores que a resistência à fadiga encontrada neste trabalho (91 MPa) indicaria uma opção do fabricante pela segurança ou robustez do componente. Por outro lado, quanto mais próximo deste valor, menor o peso da roda e maior a economia do processo. No entanto, a resistência à fadiga do material não é o único critério empregado no projeto de uma roda.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

Os resultados verificados para a composição química estão dentro do especificado na norma para a liga do alumínio AA413.1.

Os resultados obtidos em fadiga para o levantamento das curvas S-N-P seguem, estatisticamente, a mesma distribuição da log-normal.

O limite de resistência à fadiga obtido utilizando o modelo de regressão foi de 91,31 MPa. Este valor pode ser otimizado com um melhor controle do processo de fabricação que obtenha porosidade média abaixo de 1,2 % e valores médios de espaçamento interdendrítico secundário (λ_2) abaixo de 32,4 μm , uma vez que estes dois fatores apresentam grande influência na resistência à fadiga.

Este estudo pode servir de base para otimização de projetos de rodas com designs variados, mais leves e que comprometam menos sua resistência sob esforços cíclicos.

5.2 Sugestões para trabalho futuro

Os resultados encontrados neste trabalho sugerem os seguintes temas para estudos futuros:

- Comparar a metodologia aplicada para outras ligas de alumínio.
- Desenvolver um modelo computacional para simular o desenvolvimento de rodas com o limite de fadiga encontrado.
- Analisar adição de cobre na liga, dentro dos percentuais obtidos pela norma, uma vez que este elemento pode aumentar a resistência à propagação da trinca de fadiga.
- Avaliar a nucleação da trinca.

REFERÊNCIAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **O alumínio nos Transportes**. Maio: 2010. Disponível em: <<http://abal.org.br/downloads/aluminio-nos-transportes.pdf>>. Acesso em: 12 Out. 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6752: Informação e Documentação**. 2. Ed. Rio de Janeiro: 2013, p. 13.

ASTM - E155, **Standard reference radiographis for inspections of aluminum and magnesium Casting**, ASTM International, West Conshohocken (PA): 2010.

ASTM - E739-10, **Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data**, ASTM International, West Conshohocken, PA: 2010.

ASTM - E8M-04. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. ASTM International, 31 Mar. 2008.

ASM INTERNATIONAL. **Handbook, Vol. 15 Casting**. Manual, EUA, 1998.

BARROS NETO, E. F. **Testes de fadiga de rodas veiculares**: Proposta de estabelecimento, para os testes em laboratório, dos carregamentos que simulem os ocorridos no teste de durabilidade estrutural de veículo em pista. 2009. Dissertação (Mestrado profissional) – USP: 2009

BOROMEI, L; et al. **Influence of the solidification microstructure and porosity on the fatigue strength of Al-Si-Mg casting alloys**. Metallurgical Science and Technology, pp 18-24, v.28-2, 2010.

BOSI, C; GARAGNANI, G. L; TOYO, R. **Fatigue properties of a cast aluminum alloy for rims of car wheels**. Metallurgical, Science and Technology, v.20, 2002.

BOYER, H. E.; **Atlas of Fatigue Curve**. American Society for Metals. Park, OH: 1986.

CASTRO, C.A.C. **Comparative verification of fatigue in steel using bending tension tests carried through different environments**. In: WCE-2009 – World Congress on Engineering, 2009, London.

CETINEL, M.; **Investigation and Development of the Quality Control of Al-Wheel Rim Production Process**. Dissertation Master of Science. Izmir Institute of technology, Izmir, Turkey, 2001.

COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de elementos de máquinas**: uma perspectiva de prevenção de falha. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986, p. 653.

DIN 50113 (EN). **Testing of metals; Rotating bar bending fatigue test.** German National Standard, 1982.

DIN 50125 (EN). **Testing of metallic; materials tensile test,** German National Standard, 2009.

DIN EN 6506-1, **Brinell Hardness test, part 1:** test method. German National Standard, 2014.

DUAN, J; REILLY, C; MAIJER, D. M; COCKCROFT, S. L; PHILLION, A. B. **Application of Numerical optimization to aluminum Alloy Wheel Casting.** Materials Science and Engineering, 84, 2015.

FREITAS, M. A; COLOSIMO, E. A. **Confiabilidade: Análise de tempo de falha em testes de vida acelerados.** TQC - Série Ferramentas da Qualidade, Belo Horizonte (MG): UFMG, 1997.

FUOCO, R. **Fundição de ligas de alumínio.** São Paulo: IPT, 2001.

FURLAN, T. S. **Influência do teor de estrôncio na modificação da liga A356.** Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da USP, São Paulo: 2008.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e aplicações.** Campinas, SP: Unicamp, 2001.

GMW 7152, **Specification and Verification of Tensile and Fatigue Properties in cast components.** General Motors Corporation, 2002.

GRUZLESKI, J.E; BERNARD, M.C. **The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys.** American Foundry Society, Illinois, 1990.

HERNANDEZ, F. A. **Avaliação do Comportamento Microestrutural e em Fadiga da Liga Ti-35Nb-7Zr-5Ta Sinterizada e Termicamente Tratada.** Distrito Federal (DF): UNB, 2012.

HERTZBERG. R. W. **Deformation and fracture Mechanics of Engineering Materials.** 4 Ed. New York: John Wiley & Sons, 1995, p. 529.

HSU, Y. L. Prediction of fatigue failures of aluminum disc wheels using the failure probability contour based on historical test data. **Journal of Chinese Institute of Industrial Engineers.**v.21, pp. 551-558, 2004.

HSU, Y. L; YU. C. C. **Computer simulation of casting process of aluminium wheels – a case study.** ImechE, Engineering Manufacture, v. 220, 2006.

HUTER, PATRICK; RENHART, PHILIPP; OBERFRANK STEFAN; SCHWAB MARTIN; GRUN FLORIAN; STAUDER BERNHARD. **High and low-cycle fatigue influence of silicon, copper, strontium and iron on hypo-eutectic Al-Si-Mg cast alloys used in cylinder heads.** International Journal of Fatigue. pp.588-601; 2016.

ISO - International Organization for Standardization.**ISO 1143: Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing,** 2.ed., 2010, 26 p.

JACOBS, H; PRETORIUSBR, L; IAUBSCHE, R.F. **Predicting the Fatigue Properties of A356 Cast Aluminium Alloy Wheel Rim in Various Post Treatment Conditions with a Simple Monotonic tensile test.** R & D Journal, 2003.

LIU, L; SAMUEL, A. M; SAMUNEL, F. H. Influence of oxides on porosity formation in Sr-treated Al-Si casting alloys. **Journal of Material Science.** v. 38, 2003, pp. 1255 – 1267.

MAGNABOSCO, R. **Técnicas de Ensaio para previsão da Vida em Fadiga de Liga de alumínio AA7175.** LabMat – FEI – Faculdade de engenharia industrial, 2000.

MAGNABOSCO, R; CARDOSO, R.L; COLALILLO, R. **Vida em Fadiga de duas ligas Fundidas de alumínio usadas na Fabricação de rodas,** Labmat – FEI – Faculdade de engenharia Industrial: 2000.

MALAVAZI, J. **Fundição do alumínio e suas ligas** (apostila do curso). Escola Senai Nadir Dias de Figueiredo, 2008.

MALUF, Omar. **Influência do Roletamento no comportamento em fadiga de um ferro fundido nodular perlítico.** 2002. 116 f. USP, São Carlos, 2002. 116p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos (SP):2002.

MANSUR, T. R. **Avaliação do desenvolvimento de modelos de determinação de acúmulo de danos por fadiga em um aço estrutural,** Tese de doutorado, UFMG, 2003.

MATWEB, **Your Source for Materials Information.** Disponível em: <<http://www.matweb.com/>>. Acesso em: 22 Set. 2015.

MATTOS, J.J.I, UEHARA, A.Y, SATO, M. FERREIRA, I. **Fatigue Properties and Micromechanism of Fracture of an AlSiMg0.6 Cast Alloy Used in Diesel Engine Cylinder Head.** Procedia Engineering 2 (2010) 759–765.

MAYER, H; MAYER, M; PAPAKYRIACOU, M; ZETTL, B; STANZL-TSCHEGG, S.E. Influence of porosity on the fatigue limit of die cast magnesium and aluminium alloys. In. **International Journal of fatigue.** Turkenschanzstr.Viena, Austria: 2003.

MOHAMED, F.I; EMAD, M. E; SALVADOR, V; HERBERT, W. D; FAWZY, H.S. **Metallurgical Parameters Controlling the Eutectic Silicon Characteristics in Be-Treated Al-Si-Mg Alloys.** MDPI - Open Access Publishing. Département des Sciences appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, 2015.

MOHAMED, I. H; YVES, N; RAOUF, F; MATTHEW, R; DAAN, M. M. **Influence of Casting defect and SDAS on the multiaxial fatigue behaviour of 356–T6 alloy including mean stress effect.** Department of Materials Engineering, PRIME Institute, ISAE-ESMA, UPR, Cedex, France, 2015.

MOLINARI, M. **Ligas de alumínio Para Fundição e Influência dos Elementos de Liga.** Joinville (SC): Labortech, 1997.

REILLY, J; DUAN, L; YAO, D. M; MAIJER, S. L; COCKCROFT. **Process Modeling of Low-Pressure Die Casting of Aluminum Alloy Automotive Wheels.** Department of Materials Engineering, The University of British Columbia, Vancouver. Canada, 2013.

RONDON, V; NETO, C. M. **Correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas da liga fundida Al-Si-MG-E357 envelhecida.** COBEF, 2011.

ROOY, E.L. **Metals Handbook**, Casting, v. 15, ASM International, Materials Park, Ohio, 1998, pp.1622 – 1648.

SAE J328. **Wheels Passenger Car and Light Truck Performance Requirements and Test Procedures.** Superseding J328,1994.

SANTOS, J. C; ANGELONI, M; MALUF, O; MILAN, M. T; SPINELLI, D. **Efeito da adição de Magnésio sobre as propriedades de fadiga em altas temperaturas de ligas de Al-Si fundidas sob pressão em molde permante.** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu (PR): 2006.

SATYANARAYANA, N; SAMBAIAH, C.H. Fatigue Analysis of Aluminum Alloy Wheel Under Radial Load. **International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE)**, v.2, 2012.

SCHUTZ, W. **A History of Fatigue.** Engineering Fracture Mechanics, v. 54, 1996.

SCHIJVE, J. **The significance of fatigue crack initiation for predictions of the fatigue limit of specimens and structures.** International Journal of Fatigue, 2014.

SHIGLEY, J. E; MISCHKE, C. R; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica.** 7º Ed. Porto Alegre (RS): Bookman, 2005.

SILVA, A. L. L. **Comportamento à fadiga de um material de uma ponte metálica centenária sob carregamentos complexos.** Universidade três-os-montes e alto Douro. Lisboa: 2009

SMITH, W.F. **Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais.** 3.ed. MC Graw Hill, 2005.

SOUZA S. A. **Ensaio mecânicos dos materiais metálicos.** Fundamentos teóricos e práticos. Edgard Blucher, 1982.

VITA MATEO, **Análise da solidificação para o projeto de molde e a relação com as propriedades mecânica na fundição da liga de latão 60/40,** Dissertação (Mestrado) – UFGS. Porto Alegre: 2006.

WARMIZEK, M. **Aluminum-Alloys Casting alloys,** Atlas of microfractographs, ASM international, 2004.

WEICHENG CUI. A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures, **Journal of Marine Science and Technology**, 2002.

XIANG, Y; LIU, Y. Application of inverse first-order reliability method for probabilistic fatigue life prediction. In: **Probabilistic Engineering Mechanics**, v. 26, 2011, pp. 148-156.

ZHANG, B; CHEN, W; POIRIER. R.R. **Effect solidification cooling rate on the fatigue life of A356.2-T6 cast aluminium alloy.** Fatigue Eng Mater struct, 2010.

ZHANG, B; et al. **Casting Defects in Low-Pressure Die-Cast Aluminum Alloy Wheels.** Ast., 2005.

ZOLOTOREVKY, V. S; BELOV, N.A; GLAZOFF, M. V. **Casting Aluminum Alloys,** Moscou: Elsevier, 2007.