

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
ALLYSSON ANANIAS ALMEIDA GOMES

N. CLASS.....
CUTTER.....
ANO/EDIÇÃO.....

APLICAÇÃO DA LIGA A356 NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE RODAS DE
LIGA LEVE

Varginha
2014

FEPESMIG

ALLYSSON ANANIAS ALMEIDA GOMES

**APLICAÇÃO DA LIGA A356 NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE RODAS DE
LIGA LEVE**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica
do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG
como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel,
sob orientação do Prof. Esp. Fabiano Farias de Oliveira.

Varginha

2014

ALLYSSON ANANIAS ALMEIDA GOMES

**APLICAÇÃO DA LIGA A356 NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE RODAS DE
LIGA LEVE**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia
Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas –
UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de
bacharel, pela Banca Examinadora composta pelos
membros:

Aprovado em: / /

Prof.

Prof.

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho á minha família que me apoiou sempre que necessário, aos professores e mestres, pelo valioso aprendizado, aos profissionais que convivi, que contribuíram com um conhecimento indispensável para o meu desenvolvimento, aos amigos e a Tamires Barbosa, que compartilharam minhas dificuldades e me incentivaram a seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos à Deus e minha família por todo apoio, à empresa Mangels Industrial S. A. pela oportunidade, aos colegas de trabalho, que compartilharam experiências e orientações, aos Professores e Mestres pelo aprendizado.

“Ora, esse precioso metal tem a brancura da prata, a indestrutibilidade do ouro, a tenacidade do ferro, a fusibilidade do cobre e a leveza do vidro; trabalha-se facilmente e está muito disseminado na natureza, visto que forma a base da maioria das rochas. É três vezes mais leve que o ferro, e parece ter sido criado expressamente para nos fornecer o material para o nosso projétil!”

Júlio Verne, "Da Terra à Lua", 1865

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo mostrar a aplicação da liga de alumínio A356 no processo de fabricação de rodas de liga leve. Abordará também o desempenho da liga perante aos testes necessários para a aprovação das rodas. Mostrará a influência do tratamento térmico aplicado a liga durante os testes que serão realizados. Será feito também uma simples simulação em software específico, para mostrar o comportamento da solidificação do alumínio dentro do molde. Os resultados serão obtidos através de ensaios laboratoriais e simulações computacionais. Os testes laboratoriais que serão realizados são: Ensaio de tração, ensaio de dureza, metalografia, teste de fadiga dinâmica, teste de fadiga axial e teste de impacto.

Palavras Chaves: Alumínio. Desempenho. Ensaios.

ABSTRACT

This work aims to show the application of aluminum alloy A356 in the manufacturing of alloy wheels process. Also address the performance of the league before the necessary approval for the testing of the wheels. Show the influence of the heat treatment applied to league during the tests to be performed. Will also be done in simple simulation specific software, to show the behavior of the solidification of aluminum into the mold. The results will be obtained through laboratory testing and computer simulations. Laboratory tests to be performed are: traction test, hardness test, metallographic, dynamic fatigue test, axial fatigue test and impact test.

Key words: Aluminum. Performance. Trials.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Ligas de alumínio.....	11
2.2 Ligas Al-Si.....	12
2.3 Liga A356.....	14
2.4 Preparação da liga.....	15
2.5 Introdução ao processo de fabricação de rodas de liga leve.....	16
2.6 Caracterização de rodas veiculares.....	17
2.7 Fundição.....	18
2.7.1 Fundição sob baixa pressão de rodas de liga leve.....	18
2.8 Solidificação da liga A356.....	21
2.9 Tratamentos térmicos.....	23
2.9.1 Tratamento térmico T6.....	24
2.9.2 Mudança da morfologia do silício eutético.....	25
2.9.3 Morfologia micro estrutural necessária para aprovação da liga.....	28
2.10 Testes laboratoriais.....	29
2.10.1 Ensaio de fadiga axial.....	29
2.10.2 Ensaio de fadiga radial.....	31
2.10.3 Teste de impacto a 90°.....	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 Tratamento térmico.....	36
3.2 Série laboratorial.....	36
3.2.1 Ensaio de tração.....	36
3.2.2 Metalografia.....	36
3.2.3 Teste de dureza.....	37
3.2.4 Ensaio de fadiga axial.....	38
3.2.5 Ensaio de fadiga radial.....	39
3.2.6 Teste de impacto a 90°.....	39
3.2.7 Análise de solidificação de uma roda de liga leve.....	40
4 RESULTADOS E DISCUÇÕES.....	41
4.1 Ensaio de tração.....	41
4.2 Metalografia.....	43
4.3 Teste de dureza.....	44
4.4 Ensaio de fadiga axial.....	46
4.5 Ensaio de fadiga radial.....	48
4.6 Teste de impacto a 90°.....	50
4.7 Análise de solidificação.....	51
5 CONCLUSÃO.....	54
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o alumínio tem papel fundamental na nossa sociedade, em todo o mundo a busca por objetos cada vez mais leves, sofisticados e com uma longa vida útil, vem crescendo acentuadamente. Por se tratar de um metal com uma densidade de apenas $2,7 \text{ g/cm}^3$ e por apresentar boa resistência a corrosão, o alumínio vem ganhando espaços cada vez maiores com relação aos materiais previamente utilizados.

O alumínio se torna ainda mais versátil quando combinado com outros elementos, o que acontece com a liga em estudo neste trabalho. A liga A356 se destaca por conter aproximadamente 7% de silício em sua composição química e ser passiva de tratamento térmico.

O presente trabalho irá abordar a aplicação da liga A356 voltada para o processo de produção de rodas de liga leve e, analisar o desempenho do material durante os testes laboratoriais pertinentes ao processo. Também será estudado se existe influencia significativa do tratamento térmico nesta mesma aplicação.

O tratamento térmico que é aplicado na liga A356 é o T6, utilizado para aprimorar as propriedades mecânicas do material e melhorar o desempenho do produto. Embora necessária, esta etapa traz alguns ônus, tais como: custo de fabricação, deformações na peça, aumento do ciclo de produção e redução da capacidade produtiva.

Para a realização dos testes necessários, recorre-se a metalografia como método de análise da morfologia micro estrutural da liga, ensaios de tração e dureza para análise das propriedades mecânicas do material e testes que são exclusivamente voltados para aprovação de rodas, como: fadiga radial, fadiga e teste de impacto. Estas medições serão realizadas no laboratório de uma das maiores empresas de fabricação de rodas de liga leve da América Latina.

Para melhor ilustrar o processo de fundição, será apresentada uma simulação com o intuito de conhecer basicamente as frações de solidificação de uma roda dentro do molde.

Desta forma, este trabalho propõe o conhecimento sobre a liga de alumínio A356 aplicado a fabricação de rodas de liga leve, verificação do seu desempenho e a influência causada pelo tratamento térmico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligas de alumínio

Segundo Oliveira (2012, p. 2), pode-se afirmar que o alumínio é o metal não ferroso com o maior índice de consumo anual nos últimos tempos, estima-se um consumo de aproximadamente 41 milhões de toneladas por ano de alumínio primário. O grande responsável por grande parte de toda produção de alumínio no mundo é a China que hoje ocupa o posto de maior produtora de alumínio do mundo, alcançando a marca de aproximadamente 17 milhões de toneladas por ano.

De acordo com Furlan (2008, p. 2), o consumo de produtos de alumínio no Brasil vem crescendo a cada ano. Aproximadamente 72% das peças produzidas por fundição destinou-se ao mercado automobilístico. Essa grande demanda por fundidos de alumínio esta relacionada com as vantagens do processo e as características próprias do metal.

A produção de alumínio inicia-se com a extração da bauxite que é um minério encontrado a aproximadamente 4,5 metros de profundidade no solo. A bauxite é o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre, porem ele é sempre encontrado combinado com oxigênio, ferro e silício. A bauxite que consiste basicamente em óxidos de alumínio hidratados, é o elemento mais importante na produção de alumínio, é através desse minério que é extraído a alumina por um processo chamado Bayer. Em seguida, extrai-se o alumínio utilizando um processo eletrolítico. Para se chegar a 1 tonelada de alumínio primário, são necessários 2 toneladas de alumina e aproximadamente 4,5 toneladas de bauxite.

O alumínio após ser obtido é acondicionado em fornos refratários e é refinado antes do vazamento. Nesta etapa o alumínio recebe a adição de elementos de liga na forma pura ou de lingotes de alumínio enriquecidos com elementos. Durante o refino do alumínio o metal liquido é purificado com cloro gasoso, com isso o hidrogênio dissolvido é totalmente removido.

O alumínio e suas ligas são classificados conforme sua utilização seja para trabalho mecânico ou fundição. Segundo a Aluminum Association as ligas de alumínio para fundição são agrupadas conformes seus principais elementos de liga, utilizando um número de quatro dígitos com um ponto entre os dois últimos. O primeiro dígito indica o grupo em que a liga pertence, os dois seguintes apontam a liga ou a pureza do alumínio, já o ultimo numero na casa decimal, é utilizado para indicar a natureza da liga. Logo, o dígito zero indica que os limites de composição química são indicados para o uso em fundição, os dígitos 1 e 2 indicam

que são de lingotes. Para apontar variações na composição química original, normalmente ao nível de impurezas, são indicadas com uma letra maiúscula. Na tabela abaixo são indicados os grupos das ligas de alumínio para fundição (OLIVEIRA 2012, p. 6).

Tabela 01 – Designação de ligas de alumínio para fundição

Elementos principais	Série
Alumínio, 99.00% mínimo	1xx.x
Cobre	2xx.x
Silício, com adições de cobre e / ou magnésio	3xx.x
Silício	4xx.x
Magnésio	5xx.x
Zinco	7xx.x
Estanho	8xx.x
Outros elementos	9xx.x
Serie livre	6xx.x

Fonte: Oliveira, 2012, p. 6

2.2 Ligas Al-Si

As ligas Al-Si passaram a ser mais conhecidas a cerca de 54 anos atrás, quando houve uma grande evolução nas técnicas de fundição e essas ligas passaram a ser boas alternativas aos tradicionais metais da época, que eram os ferros fundidos cinzentos e nodulares e ao aço. As ligas de Al-Si vêm sendo utilizada em grande escala como ligas de fundição para a fabricação de peças como pistões para motores, metais de adição para soldagem e fabricação de rodas de liga leve.

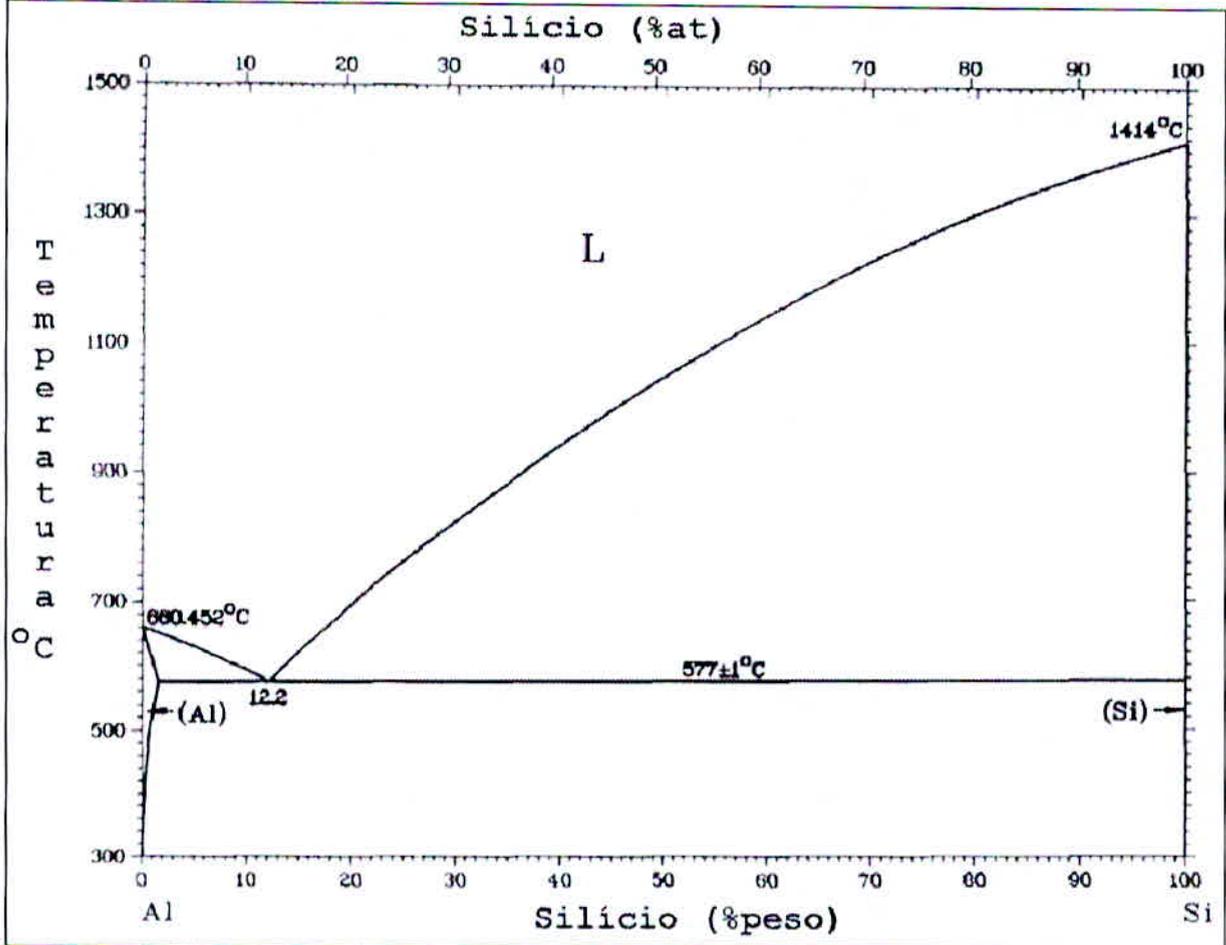
Segundo Furlan (2008, p.3), em sua dissertação ela descreve as excelentes características desta liga. A liga em estudo apresenta ótima fundibilidade e boas características físicas. Usinabilidade, resistência a oxidação, fluidez, resistência a trincas a quente e soldabilidade são características muito importantes e que se destacam na liga Al-Si. A busca pelas melhores combinações de propriedades mecânicas está diretamente ligada ao controle do metal líquido e da solidificação. Alguns fatores como modificação do eutético, refino dos grãos, teor de hidrogênio dissolvido no líquido, velocidade de solidificação e também as etapas pós-processamento como, por exemplo, o tratamento térmico, deve ser rigorosamente monitorado.

Conforme a dissertação de Oliveira (2012, p. 6, 7), o silício é um elemento de liga que se acrescentado entre 6 e 11% aproximadamente, se torna uma das mais importantes ligas de alumínio, ele é responsável pelo aumento da fluidez do metal fundido e a sua capacidade de

alimentação do molde, paralelamente aumenta também a resistência mecânica das ligas, diminuindo ainda as contrações durante a solidificação e reduzindo o coeficiente de expansão térmica. O silício conta também com a vantagem de sua baixa densidade de apenas $2,3 \text{ g/cm}^3$, com isso ele é adicionado ao alumínio sem que ocorra um aumento da densidade final das peças produzidas, mantendo assim uma das principais e mais buscadas características do alumínio, a leveza.

De acordo com Furlan (2008, p. 4), o diagrama de fases da liga Al-Si é um eutético simples (Figura 1). As ligas Al-Si mais importantes são hipoeutéticas, contendo de 7% a 11% Si.

Figura 01 – Diagrama de fases Al-Si.



Fonte: (FURLAN, 2008, p. 4)

Pode-se dizer que a microestrutura das ligas Al-Si hipoeutéticas é praticamente de dendritas de fase alfa e do eutético Al-Si. O eutético Al-Si é do tipo anômalo, pois as características de crescimento do alumínio e do silício eutéticos são facetados e não-facetado, respectivamente.

2.3 Liga A356

A liga de alumínio A356 também é conhecida como “liga 7” por conter de 6,5% a 7,5% de silício em sua composição química vem sendo a preferida das indústrias automotivas, militares e aeroespaciais. Essa grande aplicação da liga A356 se justifica por ela apresentar uma das melhores combinações de propriedades mecânicas dentre as liga Al-Si fundidas. As altas propriedades dessa liga são obtidas através do tratamento térmico T6 (solubiliza e envelhecida artificialmente), tratamento térmico que será abordado posteriormente.

Durante o processo de fundição utilizando uma liga A356, é de extrema importância que a liga seja de fácil fluidez, tenha boa fundibilidade, boa resistência mecânica e também tenha resistência a trincas de solidificação, e é por todas essas propriedades que o silício está presente na composição da liga, pois é ele o responsável por adicionar essas características ao material. O cobre e o ferro também estão presentes na liga A356, porém tratam-se de impurezas que devem ser controladas, pois esses dois elementos formam intermetálicos que fragilizam o material. O silício também apresenta a vantagem de ter baixa densidade de apenas 2,3 g/cm³; inferior a do alumínio que é 2,3 g/cm²². Em consequência, as ligas Al-Si apresentam densidade aproximadamente um terço do aço, bronze ou cobre. Sendo assim, o silício é um dos raros elementos que pode ser adicionado ao alumínio sem se preocupar com aumento de peso.

Durante a utilização da liga A356 é comum adicionar baixas quantidades de outros elementos além dos que já são comumente encontrados na liga. Esses elementos, possuem a ação de modificadores para alterar a morfologia de crescimento do silício da liga, e também titânio ou titânio boro para refinar a estrutura. Ao se falar de peças fundidas de alumínio, se torna muito importante para os produtores, o controle da formação da microestrutura durante a solidificação, pois além da microestrutura determinar as propriedades mecânicas do material, é também fator limitante de design da peça, fundibilidade e susceptibilidade à formação de defeitos e, por tanto, da qualidade da peça. (FURLAN, 2008, p. 16,17).

Conforme ABNT NBR6752 (2012, p. 9), os valores de referência para composição química da liga A356 (AlSi7%) podem ser tomados como base na tabela abaixo:

Tabela 02 – Composição química

Si	Mn	Cu	Fe	Mg	Ti	Zn	Sr	Outros	Al
6,5	0,20	0,20	0,30	0,20	0,20	0,10	0,05	0,2	Restante
7,5	Máx	Máx	Máx	0,45	Máx	Máx	Máx	Máx	

Fonte: ABNT NBR6752, 2012, p.10

De acordo com ABNT NBR6752 (2012, p. 9), as propriedades mecânicas da liga A356 devem atender as especificações conforme a tabela abaixo:

Tabela 03 – Propriedades mecânicas

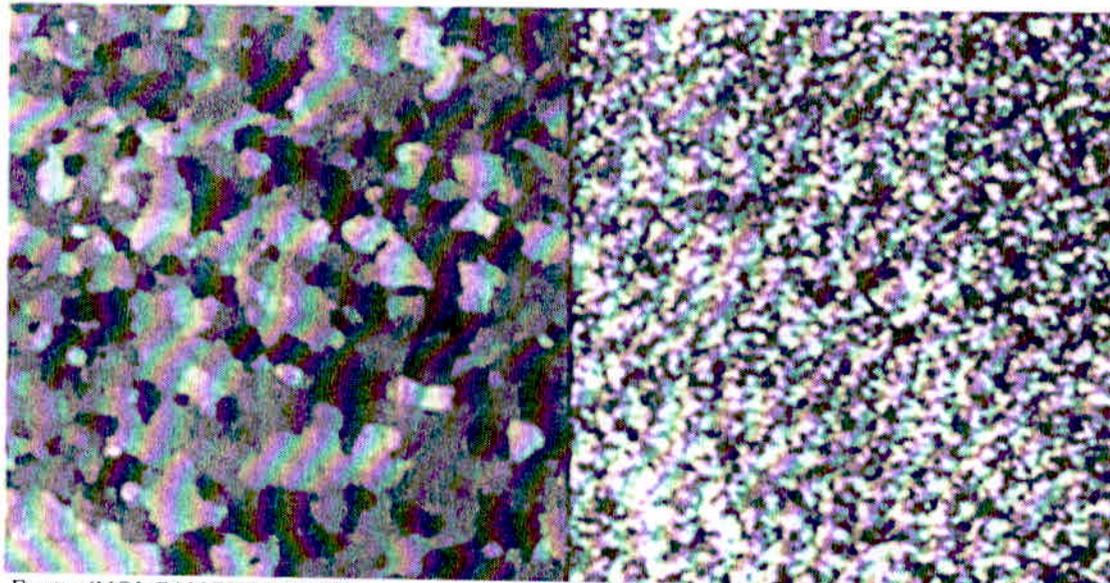
Resistência a tração (N/mm ²)	Limite de escoamento (N/mm ²)	Alongamento (%)	Dureza HB
205 mín.	115 mín	4 mín	60 mín

Fonte: ABNT NBR6752, 2012, p.11

2.4 Preparação da liga

Segundo o site da empresa Volcanowheels (2014), a fusão de lingotes de alumínio contendo 7% de silício em fornos a gás GLP, é o pontapé inicial. A utilização de fornos a gás não é o mais indicado do ponto de vista ambiental, pois nesse processo é gerado fumaça proveniente de sucatas, tintas e óleos. É importante que a liga que está sendo preparada, ofereça algumas propriedades mecânicas como um bom alongamento e tenacidade, para que a roda tenha a capacidade de absorver impactos. Para que isso ocorra, a liga é tratada da seguinte forma: primeiramente é adicionado uma ante liga com titânio e boro para que os grãos do metal fiquem o mais fino possível, o que aumenta tanto a resistência mecânica (limite de escoamento e ruptura), como o alongamento. Ver figura 02

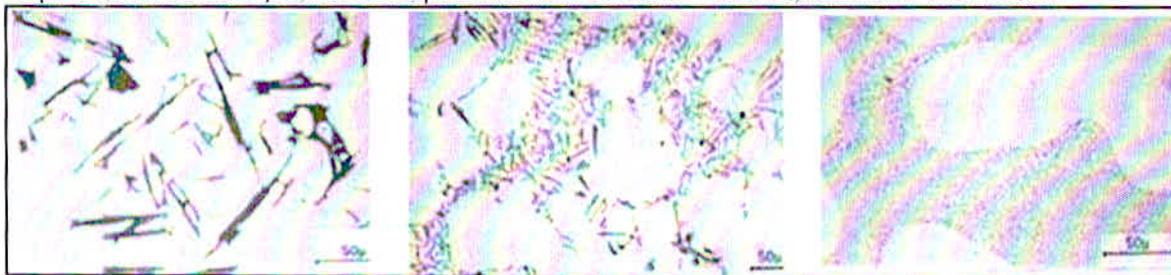
Figura 02 - Microestruturas de grãos de uma liga alumínio-silício vistas ao microscópio ótico. A foto da esquerda mostra microestrutura sem refino e a da direita microestrutura refinada.



Fonte: (VOLCANOWHEELS)

Além do refino da micro estrutura utilizando titânio e boro, a geometria das fases contendo alto teor de silício, precisam ser mais arredondadas, para que a roda tenha uma resistência a impacto maior. Para que isso ocorra, estrôncio é adicionado a liga. Veja figura 03

Figura 03 - Microestrutura vista ao microscópio ótico após tratamento de modificação com estrôncio. À esquerda, sem modificação; ao centro, parcialmente modificada e à direita, totalmente modificada.



Fonte: (VOLCANOWHEELS)

2.5 Introdução ao processo de fabricação de rodas de liga leve.

Na busca por componentes cada vez mais leves e com designs mais atrativos as rodas de liga leve utilizando ligas Al-Si, foram muito bem aceitas no mercado e em 1994, 50% dos carros novos foram equipados com rodas de liga leve. Atualmente estima-se uma produção de 800.000 rodas/ano para montadoras e 500.000 rodas/ano para o mercado secundário (FUOCO, s.d, p. 537, 538, 539).

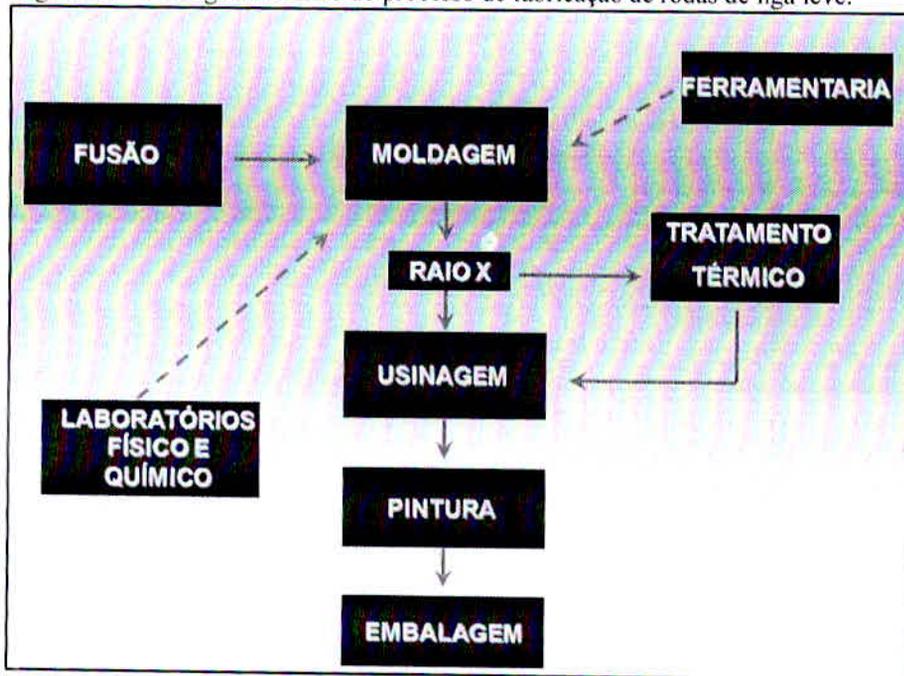
Segundo o site da Vaska (2014) o processo de produção de rodas de liga leve se inicia nos fornos de fusão com a preparação das ligas e ante ligas.

Para caso de preparação da liga a partir de metais puros, somente os fornos de indução são recomendados. Uma vez ajustada a temperatura e composição química, efetua-se o tratamento do metal líquido durante o vazamento do forno para a panela, através da adição de elementos refinadores de grãos (titânio e boro) e de elementos modificadores (sódio ou antimônio). (FUOCO, s.d, p. 537).

Após o alumínio ser fundido, ele é transportado para as injetoras controladas por comandos lógicos programáveis garantindo um produto de alta qualidade. Após o processo de fundição, as rodas brutas são 100% inspecionadas através de aparelho de fluoroscopia (Raio x), onde pode-se analisar a estrutura interna da roda e assegurar pontos com falta de enchimento de material e porosidades que possam afetar as características mecânicas da roda. As rodas fundidas com liga A356 seguem para o tratamento térmico, já as rodas fundidas com liga A413 seguem o fluxo sem passar pelo tratamento térmico e vão para o setor de usinagem. No processo de usinagem, as rodas são usinadas em tornos CNC (Comando Numérico Computacional) alcançando precisões na casa de milésimos. Logo em seguida as rodas são direcionadas para o teste de estanqueidade que garante que a roda não tenha micro

porosidades que possam causar vazamentos no perfil do aro, permitindo-se a montagem de pneu sem câmara de ar. Após o processo de pintura as rodas passam por uma preparação superficial para posteriormente entrar no processo de pintura. Na etapa de preparação as rodas são lixadas e rebarbadas, posteriormente seguem para as cabines de pintura onde são aplicadas três camadas de tintas compostas por uma camada de pó eletrostático, seguido de uma aplicação de tinta líquida, e por ultimo, a aplicação de uma camada de verniz. Vale fazer uma ressalva neste momento, pois existem rodas com acabamento diamantado, e as rodas com esse acabamento, antes de receberem a camada de verniz, passam pelo processo de diamantamento e posteriormente são envernizadas. Após o acabamento, 100% das rodas são inspecionadas pela qualidade, identificadas e acondicionadas em embalagens apropriadas para evitar danos durante o transporte.

Figura 04 – Fluxograma macro do processo de fabricação de rodas de liga leve.



Fonte: (O AUTOR)

2.6 Caracterização de rodas veiculares

Segundo a ABNT NBR13909 (2012, p. 2) roda é um “componente rotativo, de suporte de carga, localizado entre os pneus e os eixos, geralmente composto de duas partes principais, o aro e o disco da roda, que podem ser integrais, permanentemente ligadas ou separáveis.”

De acordo com Houaiss (2002), citado por Neto (2010, p. 24), a roda tem uma função estrutural e de segurança em todos os veículos que as utilizam. O conjunto roda mais pneu

tem a incumbência de manter o veículo em contato com a pista e transmitir todo o peso e esforços gerados pelo veículo para o solo. Por outro lado, também é responsável por transmitir toda a irregularidade da pista para o veículo. A roda por se tratar de uma peça que sofre rotação, os carregamentos e esforços a que esta submetida variam ciclicamente em função da rolagem do veículo.

2.7 Fundição

O processo de fundição é muito utilizado por possibilitar produtos dos mais variáveis tamanhos e design, concatenado com uma alta qualidade e produtividade do produto fundido.

A transformação dos metais e ligas metálicas em peças de uso industrial pode ser realizada por intermédio de inúmeros processos, a maioria dos quais tendo como ponto de partida o metal líquido ou fundido, que é derramado no interior de uma forma, cuja cavidade é conformada de acordo com a peça que se deseja produzir. Essa forma é chamada "molde". A forma da cavidade do molde pode ser tal que corresponda praticamente forma definitiva, ou quase definitiva, da peça projetada ou pode apresentar-se com contornos regulares – cilíndricos ou prismáticos – de modo que a peça resultante possa ser posteriormente submetida a um tratamento de conformação mecânica, no estado sólido com o que são obtidas novas formas das peças. A "cavidade" mencionada do molde, nada mais é que um negativo da peça que se deseja fabricar. (CHIAVERINI, 1986, p.1)

Segundo Chiaverini (1986, p. 1), nos dias de hoje, as peças obtidas através do processo de fundição são utilizadas em grande escala em equipamentos de transporte, comunicação, mineração, entre outras.

Dentre outros processos de fabricação como forjamento, soldagem, usinagem, etc., a fundição é o ponto de partida, pelo fato do processo proporcionar peças com formas praticamente definitivas. A fundição permite a fabricação de peças de praticamente qualquer forma, com pequenas limitações em formas e complexidade. Os processos de fundição mais conhecidos são: Fundição por gravidade, fundição sob-baixa pressão, fundição por centrifugação e fundição por precisão.

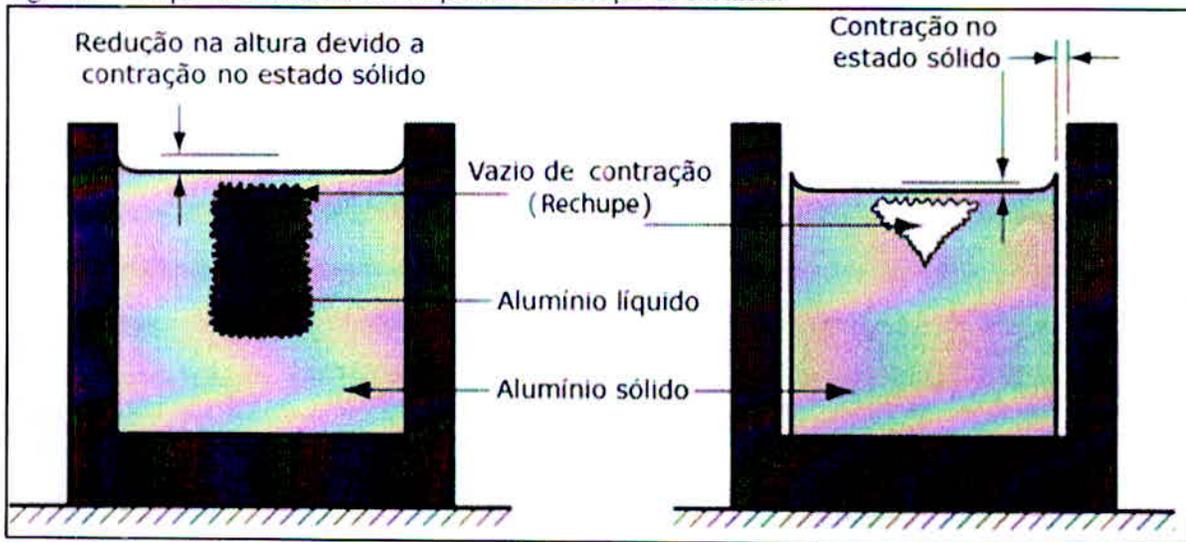
2.7.1 Fundição sob baixa pressão de rodas de liga leve.

O processo de fundição sob baixa pressão consiste no enchimento do molde através de uma pressão aplicada no alumínio líquido. Devido a pressão constante aplicada, esse processo permite a fabricação de peças de paredes de baixa espessura e formas complexas, ao contrario do processo sob gravidade que apresenta limitações quanto a espessuras de parede e design

das peças. Para garantir um completo enchimento do molde, o metal bombeado na cavidade da matriz deve ser suficiente não apenas para o preenchimento do molde, mas também deve preencher os canais localizados em pontos estratégicos para a evasão do ar. Com o preenchimento completo desses canais tem-se uma maior certeza de uma completa ocupação do alumínio em todo o molde, em contrapartida, esse preenchimento dos canais podem gerar alguma rebarba na peça. A pressão aplicada no metal líquido é mantida até que o metal se solidifique completamente, logo em seguida a completa solidificação, a matriz é aberta e a peça é extraída do molde. Nesse momento a matriz deve passar por uma rápida limpeza através de jato de ar e também ser lubrificada. (CHIAVERINI, 1986, p. 28).

Segundo o site VolcanoWheels (2014) o processo de fundição sob baixa pressão é a melhor tecnologia disponível atualmente para a manufatura de rodas de liga leve. Quando comparado com outros processos como fundição sob gravidade, o processo sob baixa pressão apresenta várias vantagens como maior controle do processo de solidificação e menores interferências humanas, garantindo maior segurança ao produto. Um dos maiores problemas em fundição é conhecido como vazios ou rechupes e por apresentar uma pressão constante durante a injeção no alumínio líquido no molde, o processo de fundição sob baixa pressão tende a minimizar esse gargalo. O problema de rechupes ou vazios como são conhecidos, é um fenômeno natural que é a contração, que ocorre durante a solidificação em grande parte dos metais. No caso da liga Al-Si a contração volumétrica na transição do estado líquido para o estado sólido, é de aproximadamente de 1,4%.

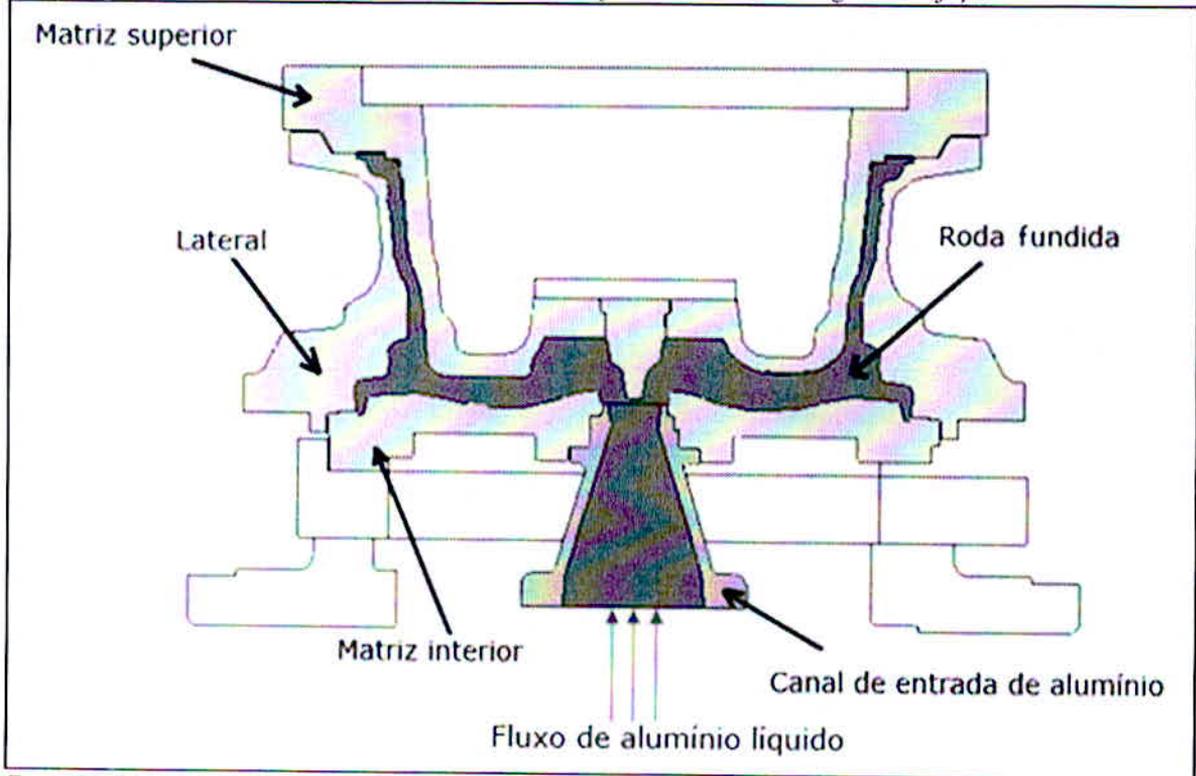
Figura 05 – Esquema mostrando a evolução da solidificação de um metal



Fonte: (VOLCANOWHEELS)

A contração é um fato natural, a estratégia utilizada no processo de fundição por baixa pressão é manter a região de alimentação no estado líquido o maior tempo possível, e paralelamente aplicar pressão ao metal líquido para que o mesmo possa preencher completamente os vazios no interior da peça.

Figura 06 – Esquema do conjunto de moldes e roda injetada mostrando a região de injeção



Fonte: (VOLCANOWHEELS)

Segundo Chiaverini (1986, p. 28) as principais vantagens do processo de fundição sob baixa pressão são as seguintes:

- É possível produzir peças com menores espessuras e maior complexidade se comparado com o processo de fundição por gravidade;
- Tolerâncias dimensionais mais apertadas;
- Grande capacidade de produção;
- Fabricação de peças praticamente acabadas;
- Utilização da mesma matriz por milhares de ciclos;

As principais desvantagens são:

- Pode haver dificuldades de evasão do ar retido no interior do molde;
- Os equipamentos são relativamente de alto custo.

2.8 Solidificação da liga A356

Segundo Furlan (2008, pag. 19) um estudioso chamado Backerud determinou o sequencial de solidificação de uma liga A356 contendo: 6,8%Si, 0,08%Fe, 0,04%Cu, 0%Mn, 0,35%Mg, 0,01%Zn e 0,15%Ti, conforme tabela abaixo:

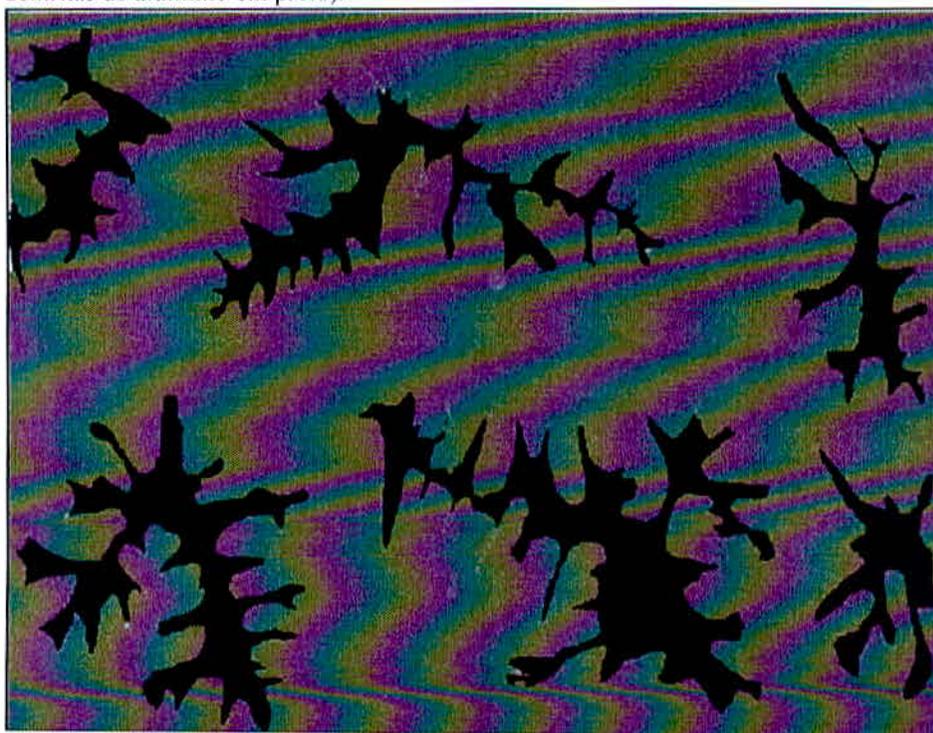
Tabela 04 – Sequência de solidificação

Número	Reações	Temperatura (°C)
1	$L \rightarrow$ dendritas de fase α	615
2a	$L \rightarrow \alpha + Si$	575
2b	$L \rightarrow \alpha + Al_5FeSi$	575
3a	$L \rightarrow \alpha + Si + Al_5FeSi$	567
3b	$L + Al_5FeSi \rightarrow \alpha + Si + Al_8Mg_3FeSi_6$	567
4	$L \rightarrow \alpha + Mg_2Si + Si$	555
5	$L \rightarrow \alpha + Si + Mg_2Si + Al_8Mg_3FeSi_6$	554

Fonte: Furlan, 2008, p. 19

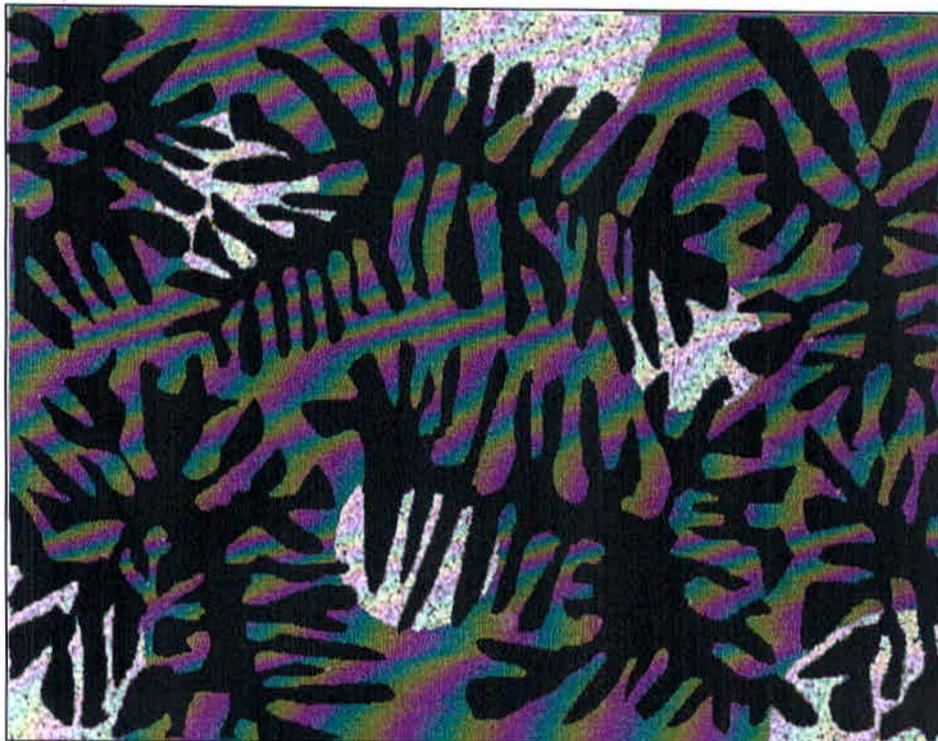
Pode-se dizer que existem dois estágios durante o processo de solidificação da liga A356: formação das dendritas de alumínio e reações eutéticas conforme as figuras 07, 08 e 09. A reação eutética principal é a reação eutética binária Al-Si, seguida de uma quantidade relativamente pequena de reações eutéticas secundárias e ternárias. (FURLAN, 2008, p. 19).

Figura 07 – Reação 1: formação das dendritas de alumínio (alumínio líquido em azul e dendritas de alumínio em preto).



Fonte: (FURLAN, 2008, p. 20)

Figura 08 – Reação 2a: Crescimento das dendritas de alumínio e nucleação do eutético Al-Si (alumínio líquido em azul, dendritas de alumínio em preto e eutético Al-Si em cinza).



Fonte: (FURLAN, 2008, p. 20)

Figura09 – Reações 2a, 2b, 3a, 3b, 4 e 5: Crescimento do eutético Al-Si e nucleação de eutéticos secundários de ferro e magnésio no líquido remanescente nas regiões de contorno de células eutéticas (alumínio líquido em azul, dendritas de alumínio em preto e eutético Al-Si em cinza).



Fonte: (FURLAN, 2008, p. 21)

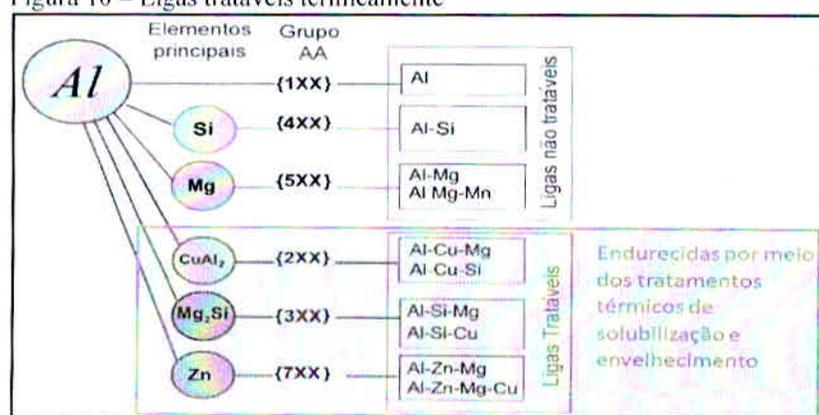
2.9 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos são aplicados em peças metálicas e são de suma importância em determinados processos de fabricação e, no processo de fabricação de rodas liga leve não é diferente. Em geral têm como finalidade alterar as microestruturas e como consequência as propriedades mecânicas das ligas metálicas.

Segundo Chiaverini (1986, p. 240), as peças metálicas estão sujeitas a várias exigências e precisam atender a requisitos mínimos para suportar as condições de trabalho que essas peças estarão sujeitas. As tensões internas e as propriedades mecânicas precisam ser compatíveis com as cargas que serão aplicadas nas peças. Na maioria das vezes os processos de fabricação não fornecem materiais em condições ideais de uso, tensões, empenamentos e as estruturas resultantes não são as mais adequadas. Por esse motivo, antes das peças serem colocadas definitivamente em serviço elas precisam passar por determinados tipos de tratamentos térmicos que objetivem eliminar ou minimizar possíveis problemas futuros com a utilização do material. Os tratamentos térmicos envolvem operações de aquecimento e resfriamento subsequente, dentro das condições controladas de temperatura, tempo a temperatura, ambiente de aquecimento e velocidade de resfriamento. Como os tratamentos térmicos envolvem um ciclo de aquecimento-temperatura, os seguintes fatores devem ser considerados: aquecimento, tempo de permanência a temperatura, ambiente do aquecimento e resfriamento.

Como este trabalho fala sobre a aplicação da liga de alumínio A356 no processo de fabricação de rodas de liga leve, direcionaremos os estudos sobre tratamentos térmicos para a liga em estudo. Conforme mostrado na figura 10, nem todas as ligas de alumínio podem ser tratadas termicamente.

Figura 10 – Ligas tratáveis termicamente



Fonte: (MOREIRA, s.d, p. 33)

O alumínio e suas ligas podem ser tratados de modo a obter combinações de propriedades mecânicas e físicas desejáveis. Os tratamentos térmicos aplicados para a liga em estudo estão baseados na variação da solubilidade dos elementos microestruturais. O aumento da temperatura até a temperatura de solidus proporciona o aumento da solubilidade dos elementos. Logo, pode-se controlar a formação e distribuição das fases precipitadas que influenciam as propriedades do material. Os tratamentos térmicos para ligas de alumínio fundidas seguem uma nomenclatura conforme tabela 05. Os tratamentos designados pela letra “T” têm como finalidade aumentar a resistência das ligas de alumínio. Este é o processo mais importante para o endurecimento e aumento da resistência mecânica das ligas de alumínio para fundição, sendo designado por endurecimento e precipitação. (OLIVEIRA, 2012, p. 20).

Tabela 05 – Nomenclatura dos tratamentos térmicos das ligas de alumínio para fundição

F	Tal como fabricado; Refere-se à condição resultante após vazamento, em que não foram realizados controlos sobre a velocidade de arrefecimento.
O	Estado recozido; Nos produtos fundidos, indica um recozimento para alívio de tensões e estabilidade dimensional, levando ao estado com menor resistência mecânica e de maior ductilidade.
T1	Envelhecimento natural; O produto é arrefecido desde a temperatura a que é fundido e envelhecido naturalmente até a um estado de propriedades mecânicas estáveis.
T4	Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento natural para um estado de propriedades mecânicas estáveis.
T5	O produto é arrefecido desde a temperatura a que é fundido e seguidamente envelhecido artificialmente.
T6	Tratamento térmico de solubilização e seguidamente envelhecido artificialmente.
T7	Tratamento térmico de solubilização e seguidamente envelhecimento artificial para um estado de propriedades mecânicas estáveis. Designado também por sobre-envelhecimento.

Fonte: Oliveira, 2012, p. 20

2.9.1 Tratamento térmico T6

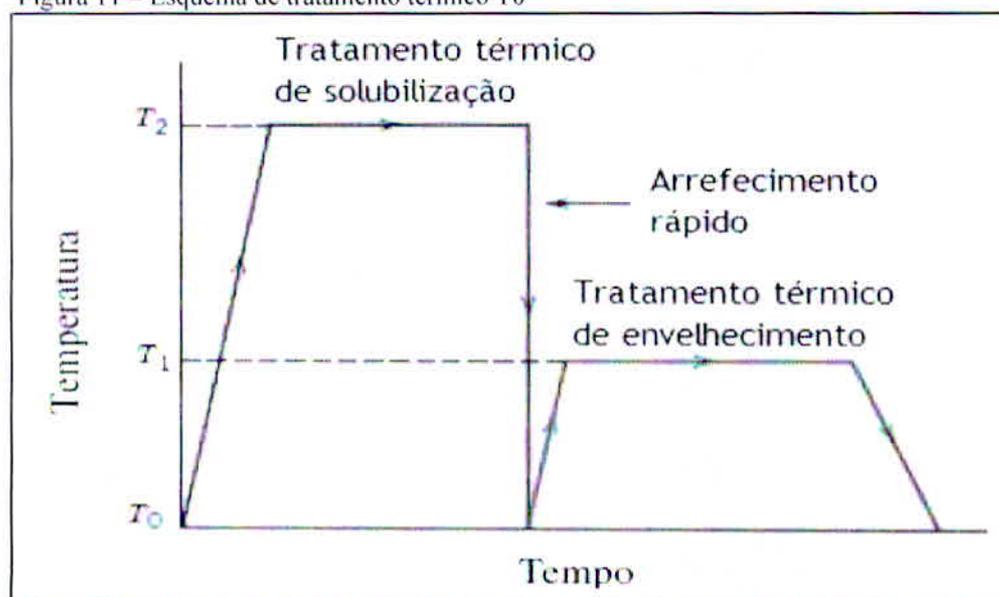
Conforme Furlan (2008, p. 70) descreve em seu mestrado, as ligas de alumínio de alta resistência precisam passar pelo tratamento térmico T6 que é constituído por dois processos, primeiro passa pelo processo de solubilização a temperaturas em torno de 535°C e permanece nessa condição por 4 a 12 horas seguidas de resfriamento brusco. Em seguida faz-se o envelhecimento a temperaturas em torno de 165°C por tempos de 3 a 6 horas.

Segundo Oliveira (2012, p. 21, 22), o processo de solubilização tem como objetivo solubilizar os elementos que constituem a liga, isto é, dissolver as fases intermetálicas e permitir a formação de uma solução sólida com elementos que serão responsáveis pelo

endurecimento. Além de promover uma dissolução dos elementos endurecedores da liga, o processo de solubilização provoca uma alteração na morfologia das partículas de silício eutético, isso ocorre através da esferoidização e coalescimento da liga.

De acordo com Lima (2012, p. 10), o envelhecimento é o ultimo passo do tratamento térmico e é utilizado para se obter uma distribuição densa e uniforme de precipitados e dão a liga uma maior resistência mecânica e dureza. Pode ser realizado em temperaturas ambientes e ser designado envelhecimento natural, ou a temperaturas mais elevadas e então ser designado envelhecimento artificial. Durante o processo, a peça é aquecida até a temperatura T_1 , representada na figura 11, o objetivo nessa fase é gerar taxas de difusão capazes de promover a nucleação de precipitado metastáveis ricos em soluto. Logo após o envelhecimento, a peça é arrefecida até a temperatura ambiente. As propriedades mecânicas como resistência e dureza alcançadas pela liga dependem da temperatura e do tempo de envelhecimento.

Figura 11 – Esquema de tratamento térmico T6



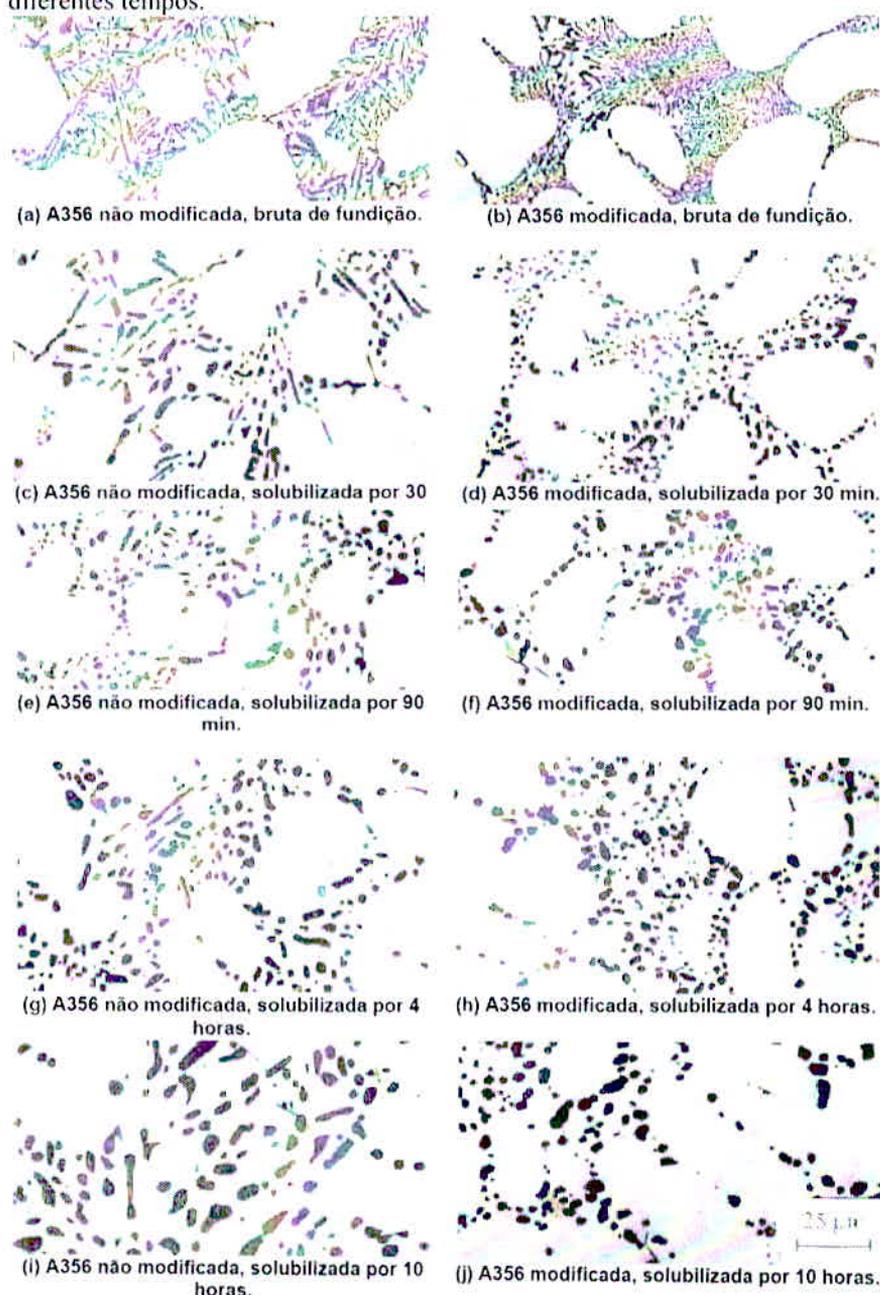
Fonte: (VOLCANOWHEELS)

2.9.2 Mudança na morfologia do silício eutético

De acordo com Furlan (2008, pag. 72), as propriedades mecânicas de uma liga Al-Si estão diretamente ligas a morfologia do silício eutético. Durante o processo de solubilização as partículas de silício passam por uma esferoidização e engrossamento simultaneamente. Pode-se dizer que o processo de esferoidização é dividido em duas partes: primeiramente as partículas de silício se fragmentam em partes menores e, escalonadamente, essas partes

menores passam por um processo de esferoidização individual. A modificação tem grande influencia na cinética de fragmentação e esferoidização das partículas de silício. Em ligas com morfologia em bastonetes o tempo de esferoidização do silício é bem menor do que para ligas não modificadas, com morfologia lamelar ou acicular. Ver figura 12 e figura 13. É necessário apenas 30 minutos para se obter uma esferoidização em amostras bem modificadas, enquanto após uma solubilização de aproximadamente 8 horas, ainda há sinais de partículas interconectadas em amostras não modificadas.

Figura 12 – Morfologias do silício eutético após solubilização a 540°C por diferentes tempos.



Fonte: (FURLAN, 2008, p. 72,73)

Figura 13 – Morfologia do silício eutético com ataque profundo, após solubilização a 540°C por diferentes tempos.



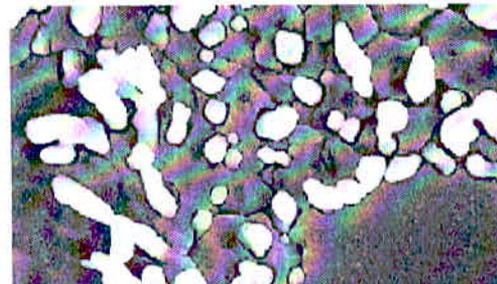
(a) A356 não modificada, bruta de fundição.



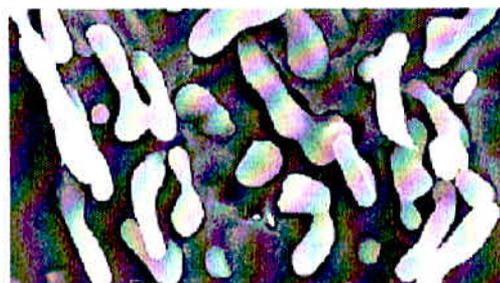
(b) A356 modificada, bruta de fundição.



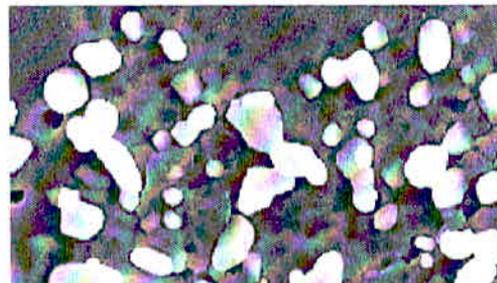
(c) A356 não modificada, solubilizada por 30 min.



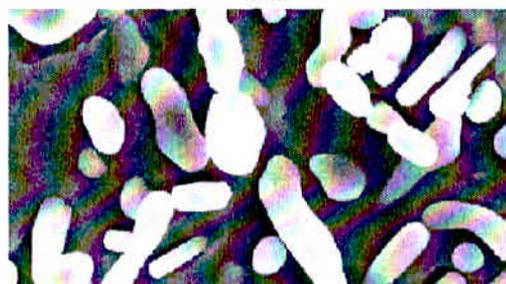
(d) A356 modificada, solubilizada por 30 min.



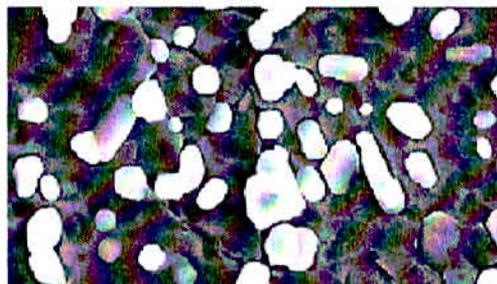
(e) A356 não modificada, solubilizada por 90 min.



(f) A356 modificada, solubilizada por 90 min.



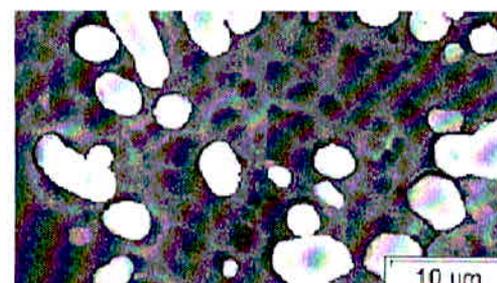
(g) A356 não modificada, solubilizada por 4 horas.



(h) A356 modificada, solubilizada por 4 horas.



(i) A356 não modificada, solubilizada por 10 horas.



(j) A356 modificada, solubilizada por 10 horas.

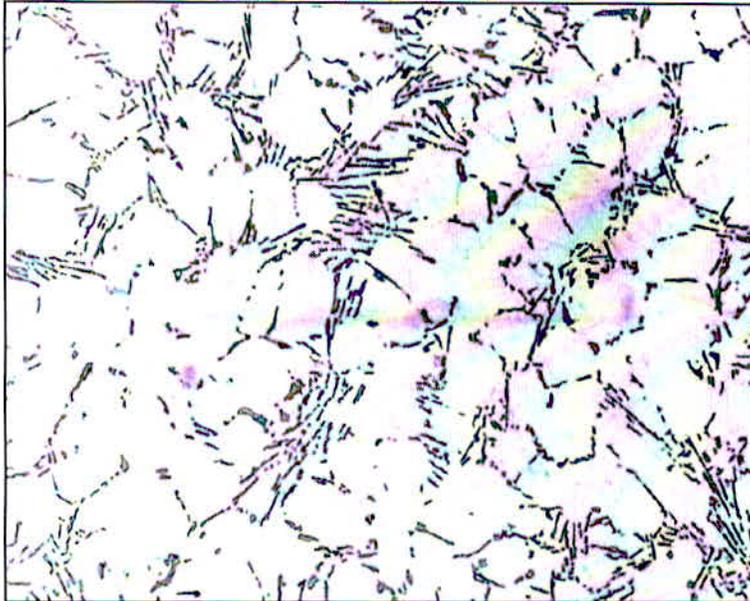
Fonte: (FURLAN, 2008, pag. 74, 75)

2.9.3 Morfologia micro estrutural necessária para aprovação da liga.

As morfologias que o silício pode assumir uma liga Al-Si hipoeutéticas podem ser divididas em: partículas massivas, em placas acicular e lamelar, angulares, e fibrosas. (FURLAN, 2008, pag. 16).

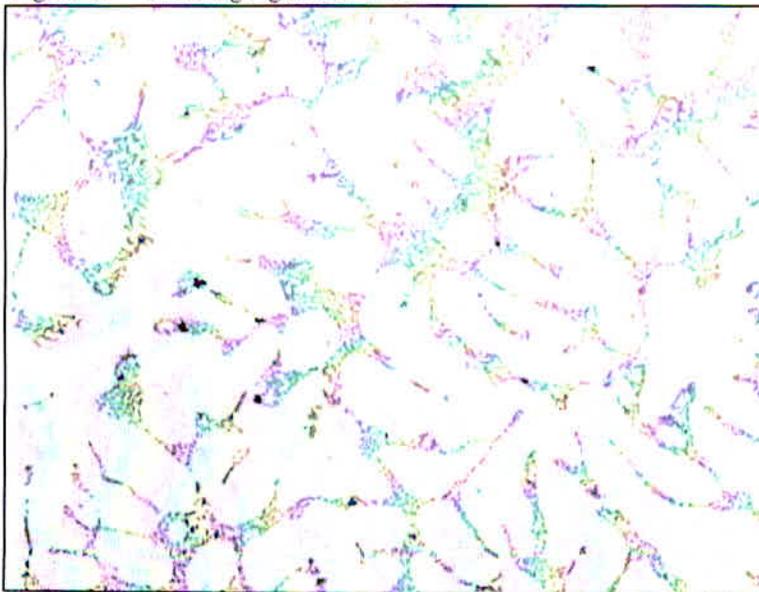
Segundo a norma B54 2110 PSA PEUGEOT CITROEN (2014, pag. 16) as morfologias estruturais necessárias para aprovação metalográfica da liga A356, devem ser de preferencia fibrosas ou em segundo caso lamelar, tendo a morfologia acicular como reprovada.

Figura 14 – Morfologia globular acicular (Reprovado)



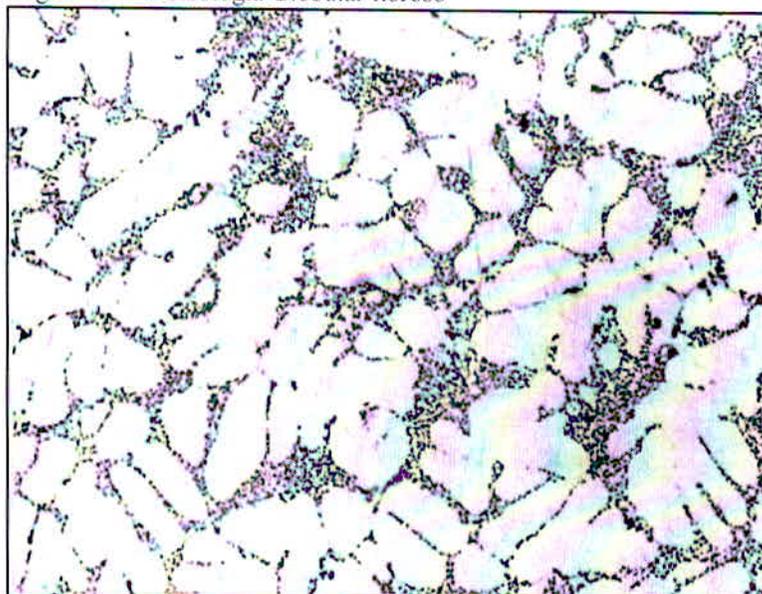
Fonte: (B54 2110 PSA PEUGEOT CITROEN, 2014, p. 16)

Figura 15 – Morfologia globular lamelar



Fonte: (B54 2110 PSA PEUGEOT CITROEN, 2014, p. 16)

Figura 16 – Morfologia Globular fibroso



Fonte: (B54 2110 PSA PEUGEOT CITROEN, 2014, p. 16)

2.10 Testes laboratoriais

Após a liga A356 ser fundida e se tornar rodas, as mesmas precisam passar por uma série de testes laboratoriais, assim pode-se afirmar com maior segurança as condições estruturais reais que a peça está apresentando. As rodas quando estão em campo, estão sujeitas a vários esforços que podem levar a peça ao colapso, para garantir que a roda irá suportar todos os esforços previstos em projeto, alguns ensaios são feitos simulando diretamente o funcionamento da roda em campo e expondo as peças a esforços bem próximos das que estarão sujeitas em trabalho. Os testes normalmente aplicados nas rodas de liga leve são: Teste de fadiga axial, teste de fadiga radial e teste de impacto.

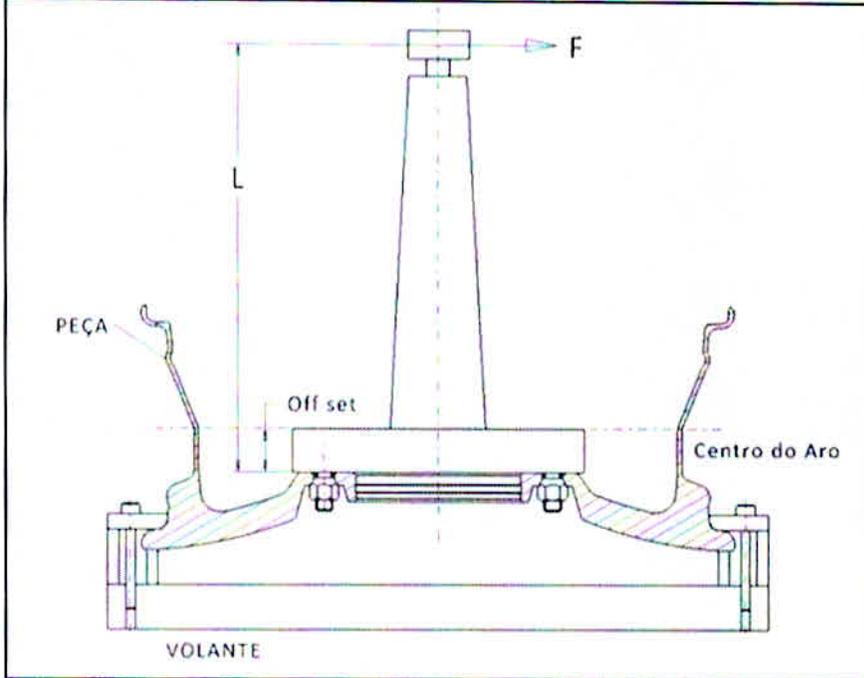
2.10.1 Ensaio de fadiga axial

O equipamento para o ensaio deve ter um sistema de acionamento rotativo que permita, quando a roda girar, submetê-la a um momento fletor ou, quando fixa, submetê-la a um momento fletor rotativo [...] recomenda-se o comprimento do braço mínimo de 750 mm (ABNT NBR 6752, 2012, p3).

De acordo com Neto (2010, p.62) a roda para ser testada deve ser fixada pelo flange interna do aro na placa da máquina, e o eixo que irá transmitir o momento é ficado no cubo da roda. Com essa montagem, o ensaio simula a roda montada na ponta de eixo do veículo. Do outro lado do eixo é acoplado uma célula de carga responsável por aplicar uma força axial gerando um momento. Existe também uma célula de carga responsável por medir a variação

da carga aplicada, essa célula bloqueio o ensaio de se houver uma variação superior a 2,5% do valor nominal da carga de teste.

Figura 17 – Montagem da roda na máquina de fadiga



Fonte: (ABNT NBR 6752, 2012, p.3)

A fórmula utilizada para o cálculo do momento de força a ser aplicado no eixo está demonstrada na equação abaixo:

$$M = W(Ru + d)Q$$

Onde:

M = momento de força a ser aplicado (N.m)

W = metade da máxima carga vertical especificada para o eixo do veículo (N)

R = raio dinâmico do pneu

u = coeficiente de atrito entre o pneu e a pista, usualmente utiliza-se $u = 0,7$

d = inset ou outset

Q = fator de carregamento determinado em função do material e da posição da roda, quando montada no veículo. Para rodas fundidas e forjadas utiliza-se Q dianteiro = 2, Q traseiro = 1,75 e ciclagem mínima = 50.000.

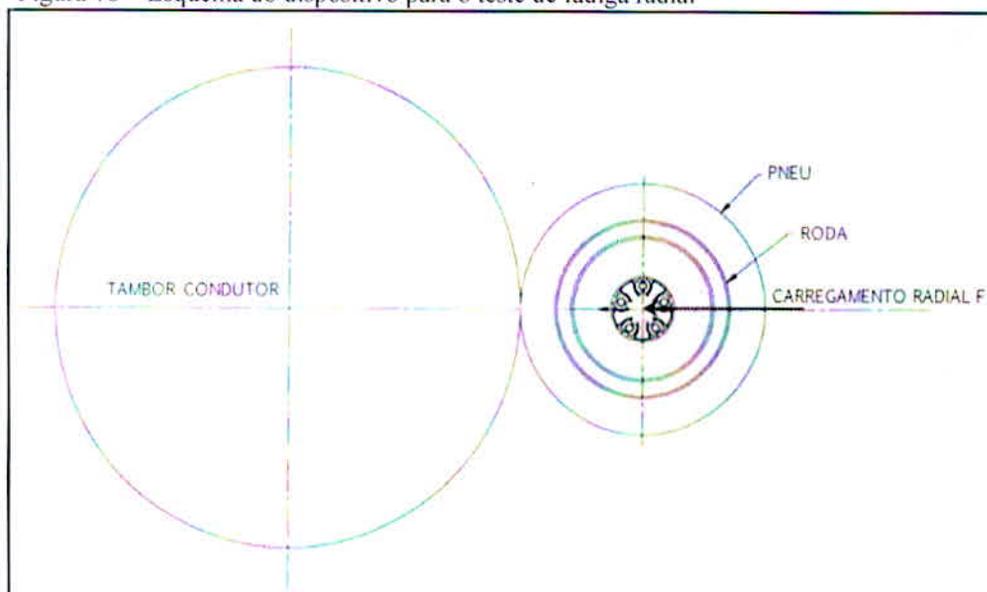
Segundo a norma SAE J328 ([?], apud NETO, 2010, p. 64), para que a roda seja considerada aprovada no teste de fadiga axial, a mesma precisa suportar um número mínimo de ciclos determinados e sem falhas. Além disso, a norma especifica que caso ocorra uma deflexão no ponto de aplicação de carga superior a 20% da deflexão inicial, o teste deve ser interrompido.

2.10.2 Ensaio de fadiga radial

O equipamento de ensaio deve ser equipado com um sistema que permita uma carga radial constante quando a roda girar. Existem numerosos sistemas. O equipamento recomendado compreende um sistema de volante acionado em rotação, o qual possui uma superfície lisa maior do que a largura da banda de rodagem do pneu de ensaio carregado. O diâmetro mínimo recomendado do volante é de 1.700 mm. A carga transmitida pela fixação da roda a ser ensaiada e do pneu deve ser normal a superfície, e no alinhamento do centro da roda e do volante, os eixos do volante e da roda devem estar paralelos (ABNT NBR 6752, 2012, p3).

Segundo Neto (2010, p.64), o teste de fadiga radial deve ser realizado em um equipamento que contenha um tambor com o diâmetro especificado por norma e capaz de realizar 187,5 revoluções por quilometro e de um equipamento incumbido de aplicar uma carga radialmente conforme figura 18.

Figura 18 – Esquema do dispositivo para o teste de fadiga radial



Fonte: (NETO, 2010, p.11)

De acordo com Neto (2010, p. 11), pelo fato do teste ser realizado com o conjunto roda e pneu montado, recomenda-se que o teste seja realizado com o tamanho máximo de pneu que pode ser montado na roda, do tipo especificado para uso no veículo. A pressão de inflagem deve ser verificada de modo que, se a pressão normal de uso do pneu é de 310 kpa ou menos, o pneu deve ser inflado para o teste com pressão de 448 kpa \pm 14 kpa. Se acontecer da pressão normal de uso do pneu for superior a 310 kpa, deve-se adotar uma pressão 1,2 vezes maior que a pressão recomendada para a sua utilização, obedecendo sempre a pressão mínima de 448 kpa. A carga radial a ser aplicada é calculada pela equação abaixo:

$$F = WK$$

Onde:

F = Carga a ser aplicada radialmente na roda

W = Metade da carga especificada para o eixo do veículo

K = Fator em função do material da roda, e da posição da roda no veículo.

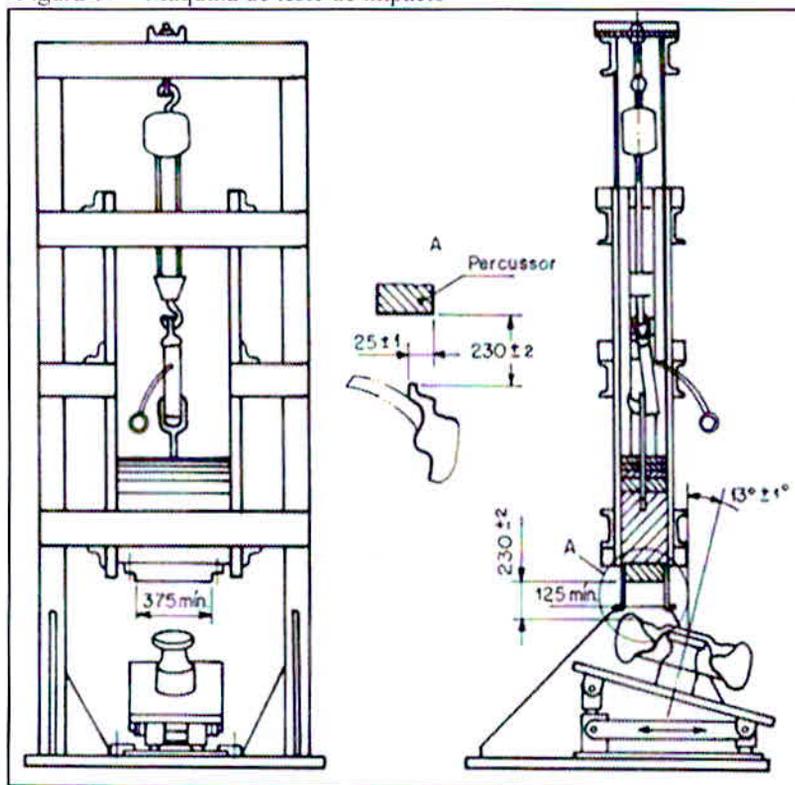
Para rodas de alumínio que são montadas tanto no eixo dianteiro quanto no eixo traseiro, dota-se $K = 2,5$ e ciclagem mínima = 600.000.

De acordo com a norma SAE J328 ([?], apud NETO, 2010, p. 66), a roda deve suportar o número mínimo de ciclagem pré-determinados para que a mesma possa ser considerada aprovada. O teste deve ser finalizado quando houver uma perda de pressão pelo pneu em razão de uma trinca por fadiga ou pela incapacidade da roda em sustentar o carregamento de teste.

2.10.3 Teste de impacto

Segundo a ABNT NBR6752 (2012, p. 3) o teste de impacto deve ser feito em “Aparelhagem com dispositivo de ação vertical, tendo uma face de impacto de pelo menos 125 mm de largura e 375 mm de comprimento e acabamento plano com bordas arredondadas ou chanfradas...”.

Figura 19 – Máquina de teste de impacto



Fonte: (ABNT NBR 6752, 2012, p. 5)

O teste de impacto visa colocar a roda em condições que simulam os choques que as rodas podem sofrer durante o uso.

Segundo a ABNT NBR6752 (2012, p. 8), a roda que será testada deverá estar em conjunto com o pneu e ser montada na máquina de impacto de modo que a carga seja aplicada no flange do aro da roda. A roda deve ser montada com seu eixo formando um ângulo de $13^\circ \pm 1$ ou $90^\circ \pm 1$ em relação ao eixo vertical. Segundo a ABNT NBR6752 (2012, p9), “A massa de impacto m , com uma tolerância de $\pm 2\%$, expressa em quilogramas (kg), deve ser determinada conforme cálculo abaixo:”

$$m = 0,6 \times F + 180$$

Onde:

F = A carga máxima na roda do veículo para o qual foi prevista, expressa em quilogramas (kg), conforme especificada pelo construtor da roda quando não especificada pelo fabricante do veículo.

The first part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the various branches of industry and commerce. It is found that the country is generally prosperous and that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress. The report then proceeds to give a detailed account of the various branches of industry and commerce, and the progress of each. It is found that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress, and that the country is generally prosperous.

The second part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the various branches of industry and commerce. It is found that the country is generally prosperous and that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress. The report then proceeds to give a detailed account of the various branches of industry and commerce, and the progress of each. It is found that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress, and that the country is generally prosperous.

The third part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the various branches of industry and commerce. It is found that the country is generally prosperous and that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress. The report then proceeds to give a detailed account of the various branches of industry and commerce, and the progress of each. It is found that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress, and that the country is generally prosperous.

The fourth part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the various branches of industry and commerce. It is found that the country is generally prosperous and that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress. The report then proceeds to give a detailed account of the various branches of industry and commerce, and the progress of each. It is found that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress, and that the country is generally prosperous.

The fifth part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the various branches of industry and commerce. It is found that the country is generally prosperous and that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress. The report then proceeds to give a detailed account of the various branches of industry and commerce, and the progress of each. It is found that the various branches of industry and commerce are all making rapid progress, and that the country is generally prosperous.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados dois corpos de prova padronizados, dois perfis e duas rodas de liga leve para a realização de todos os testes necessários. Tanto os corpos de prova quanto os perfis foram retirados de um modelo específico de roda aro quinze polegadas. Será utilizado sempre um modelo tratado termicamente e outro sem tratamento térmico. Deste modo, serão realizados alguns testes que, além de podermos verificar o desempenho da liga, poderemos ver a influência que o que o tratamento térmico provavelmente causará para a liga A356 aplicada ao processo de rodas de liga leve.

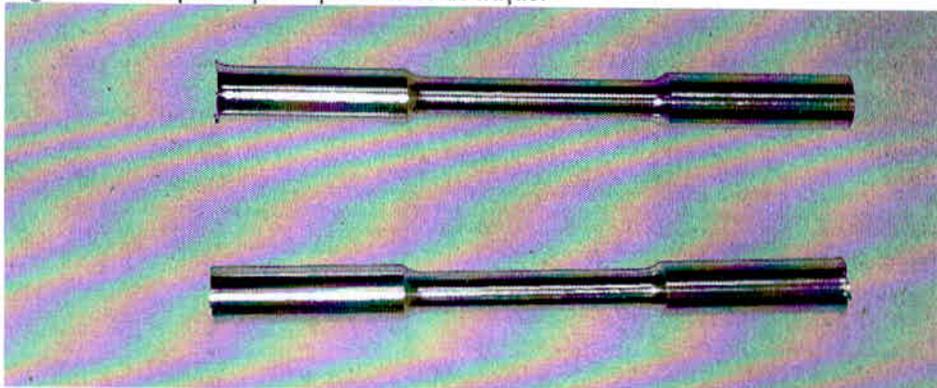
Nos corpos de prova padronizados será realizado um ensaio de tração, nos perfis será realizado um ensaio de dureza e também será feita uma metalografia para compararmos uma morfologia micro estrutural tratada com outra morfologia sem tratamento térmico. Nas rodas de liga leve serão feitos alguns testes necessários para a aprovação de um modelo de roda fundido com liga A356, os testes que serão realizados nas rodas são: Teste de fadiga radial, teste de fadiga axial, teste de impacto a 90°.

O primeiro procedimento realizado foi separar dez rodas fundidas em liga A356 e aplicar tratamento térmico em cinco delas. Logo em seguida foi retirado os corpos de prova e os perfis de uma roda tratada e de uma roda sem tratamento térmico. As oito rodas que sobraram, sendo quatro tratadas termicamente, foram encaminhadas para o laboratório de teste de fadiga e teste de impacto. Os corpos de prova foram cuidadosamente usinados em tornos específicos e por pessoas especializadas, em seguida, encaminhados para a máquina de tração, já os perfis foram cortados em serra de fita utilizando água como meio refrigerante, rebarbados e encaminhados para o laboratório de metalografia e posteriormente para o teste de dureza.

Além dos testes laboratoriais, será realizado através do software ProCast, uma breve simulação de solidificação do alumínio no molde com o intuito de visualizar as frações de solidificação em função do tempo. Paralelamente, será possível verificar regiões com maiores tendência a formação de porosidade. O software que foi utilizado se trata de um software dedicado para trabalhos com fundição e análise do comportamento do metal líquido.

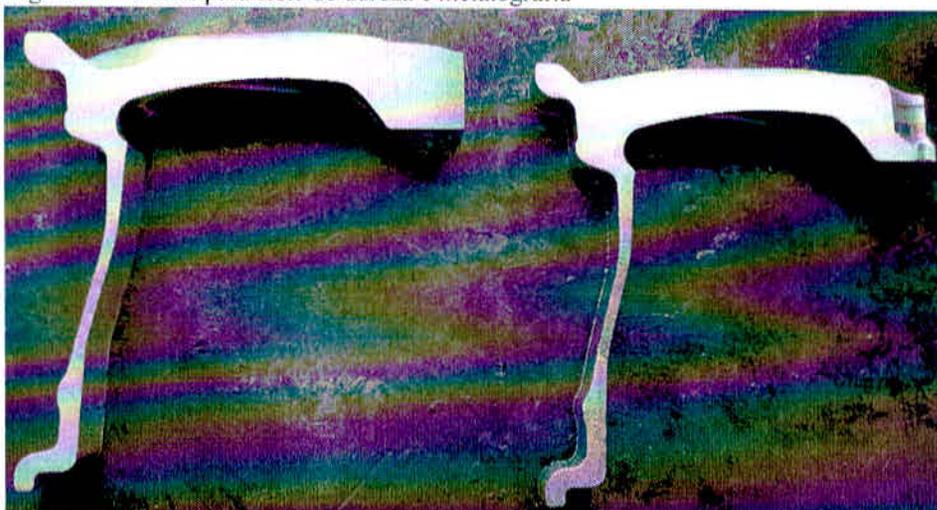
Os materiais que serão testados podem ser vistos nas figuras 20, 21 e 22.

Figura 20 – Corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte: (O AUTOR)

Figura 21 – Perfis para teste de dureza e metalografia



Fonte: (O AUTOR)

Figura 22 – Roda para testes de fadiga radial e axial, testes de impacto 13° e 90°.



Fonte: (O AUTOR)

3.1 Tratamento térmico

As peças a serem testadas foram tratadas em um forno a gás GLP. O tratamento térmico aplicado foi o T6. Primeiramente as peças passaram pelo processo de solubilização, onde as peças permaneceram no forno a uma temperatura de 545°C durante um período de tempo de 5 horas e 30 minutos. Passado esse tempo, as peças passaram por um choque térmico em banho de água a 90°C. Na sequência foi realizado um envelhecimento natural nas peças. A temperatura do forno foi reduzida para 163°C e as peças permaneceram a essa por um período de tempo de 3 horas, em seguida foram resfriadas ao ar livre.

3.2 Série laboratorial

3.2.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina Instron modelo 3382 com o auxílio de um extensômetro para coletarmos a curva de tração e deformação. Os corpos de prova foram retirados de duas rodas, uma tratada termicamente e outra sem tratamento térmico, em seguida foram usinados conforme os padrões da norma ABNT NBR 6752, 2012, pag. 11. Segundo a norma, para que o material possa ser julgado como aprovado ele deve atender as propriedades mecânicas conforme abaixo.

Tabela 06 – Valores mínimos para aprovação

Resistência a tração	Limite de escoamento	Alongamento
205 N/mm ²	105 N/mm ²	4%

3.2.2 Metalografia

O ensaio de metalografia se justifica para este estudo pela possibilidade de nos mostrar a micro estrutura presente nos materiais com e sem tratamento térmico. As amostras a serem analisadas foram cortadas de modo a não sofrer alterações que possam influenciar nos resultados. Para o corte primário, foi utilizado uma serra de fita e em sequência, foi realizado um corte mais aproximado da região a ser testada, para esse segundo corte foi utilizado um equipamento denominado “cut-off”, que faz um corte mais preciso utilizando-se um fino disco abrasivo e bastante refrigeração para evitar um aquecimento excessivo da amostra. Após

as amostras terem sido cortadas corretamente, iniciou-se o processo de lixamento utilizando lixas com granulometria de 220, 400 e 600. Todo o processo de lixamento foi realizado sob refrigeração com água. Em seguida, foi feito o polimento das amostras em uma máquina politriz Buehler Metaserv 3000. Para um polimento de qualidade foi utilizado um abrasivo líquido chamado alumina e sempre refrigerando a peça com água corrente. Para finalizar o ensaio metalográfico e revelar a micro estrutura das amostras, foi realizado um ataque químico nas peças, as mesmas permaneceram submersas em ácido fluorídrico a 0,5% por aproximadamente 10 segundos.

Conforme já foi falado nesse trabalho, as morfologias procuradas nos materiais são as fibrosas e lamelares, tendo a acicular como uma morfologia não apropriada.

Figura 23 – Máquinas “Cut-off” e politriz, sendo a da esquerda a máquina “cut-off” e a da direita a máquina politriz.



Fonte: (O AUTOR)

3.2.3 Teste de dureza

Para verificarmos a dureza do material, foram utilizados dois perfis retirados de duas rodas, sendo uma tratada termicamente e outra sem tratamento térmico. As amostras utilizadas são derivadas das peças que foram utilizadas durante o ensaio de metalografia. Com este teste será possível analisar o nível de dureza das amostras e verificar se atendem a norma

tomada como referencia ou não. Para os corpos de prova serem considerados aprovados, o mesmos devem alcançar um nível de dureza de 60 HB.

O ensaio foi realizado em um durômetro de bancada Pantec modelo RBS – DIG, utilizando a unidade de medida HB, uma esfera de 5 mm e uma carga de 250 kgf.

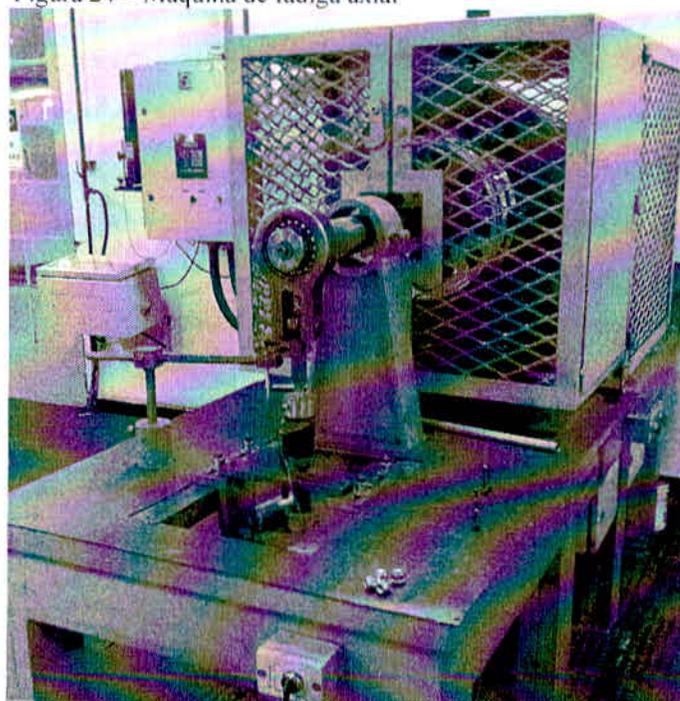
3.2.4 Ensaio de fadiga axial

O ensaio de fadiga axial foi realizado em uma máquina apropriada para o teste conforme imagem 26. O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6752, 2012, pag. 5, 6. Para o ensaio em questão foi utilizado duas rodas, sendo uma tratada termicamente e outra sem tratamento térmico. O critério de aprovação será: Após a ciclagem mínima não poderá haver trincas na peça, no qual será inspecionada com líquido penetrante, os parafusos também serão inspecionados com taquímetro e não será permitido perda excessiva de torque. Os parâmetros de testes e os critérios de aprovação das rodas podem ser vistos na tabela 07.

Tabela 07 – Parâmetros de teste			
Momento fletor	Rotação	Torque nos parafusos	Ciclagem mínima
2,01 KN.m	350 r.p.m	100 Nm á 120 Nm	150.000

Fonte: O autor

Figura 24 – Máquina de fadiga axial



Fonte: (O AUTOR)

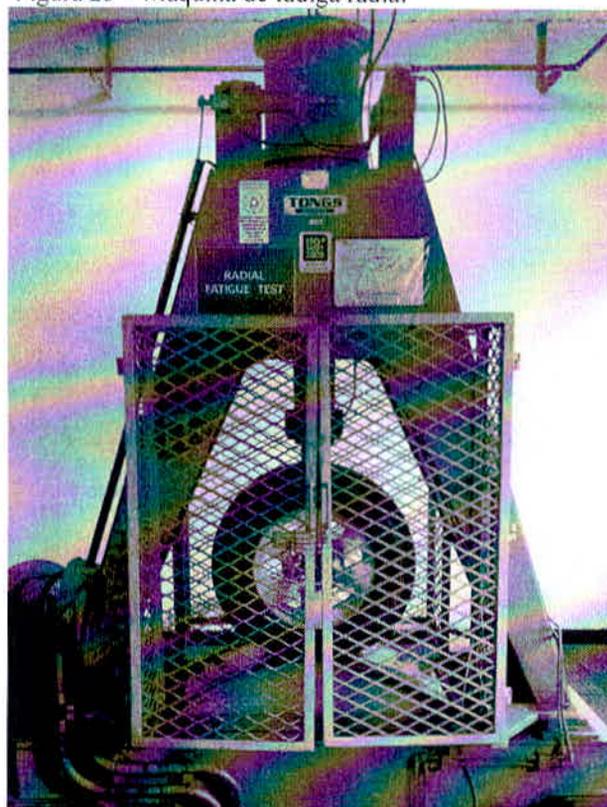
3.2.5 Ensaio de fadiga radial

O ensaio de fadiga radial foi realizado em uma máquina apropriada para o teste conforme imagem 21. O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6752, 2012, pag. 6, 7. Para o ensaio em questão foi utilizado duas rodas, sendo uma tratada termicamente e outra sem tratamento térmico. O critério de aprovação será: Após a ciclagem mínima não poderá haver trincas na peça, no qual será inspecionada com líquido penetrante, os parafusos também serão inspecionados com taquímetro e não será permitido perda excessiva de torque. Os parâmetros de testes e os critérios de aprovação das rodas podem ser vistos na tabela 08.

Tabela 08 – Parâmetros de teste			
Carga radial	Rotação	Torque nos parafusos	Ciclagem mínima
11,03 KN.m	440 r.p.m	100 Nm á 120 Nm	1.500.000

Fonte: O autor

Figura 25 – Máquina de fadiga radial



Fonte: (O AUTOR)

3.2.6 Teste de impacto 90°

O ensaio de fadiga radial foi realizado em uma máquina apropriada para o teste conforme imagem 22. O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da ABNT

NBR6752 (2012, pag. 8, 9). Para o ensaio em questão foi utilizado duas rodas, sendo uma tratada termicamente e outra sem tratamento térmico. O critério de aprovação será: Após o impacto não poderá ocorrer a separação da borda do disco. Os parâmetros de testes e os critérios de aprovação das rodas podem ser vistos na tabela 08.

Tabela 09 – Parâmetros de teste

Carga de impacto	Pneu	Pressão
504 Kg	175/65 R15	200 KPa

Fonte: O autor

Figura 26 – Máquina de teste de impacto



Fonte: (O AUTOR)

3.2.7 Análise de solidificação de uma roda de liga leve

As análises de solidificação foram realizadas no software ProCast com a intenção de observar a solidificação do alumínio dentro do molde variando com o tempo. Com esta análise, também será possível visualizar pontos com maior tendência de formação de porosidade.

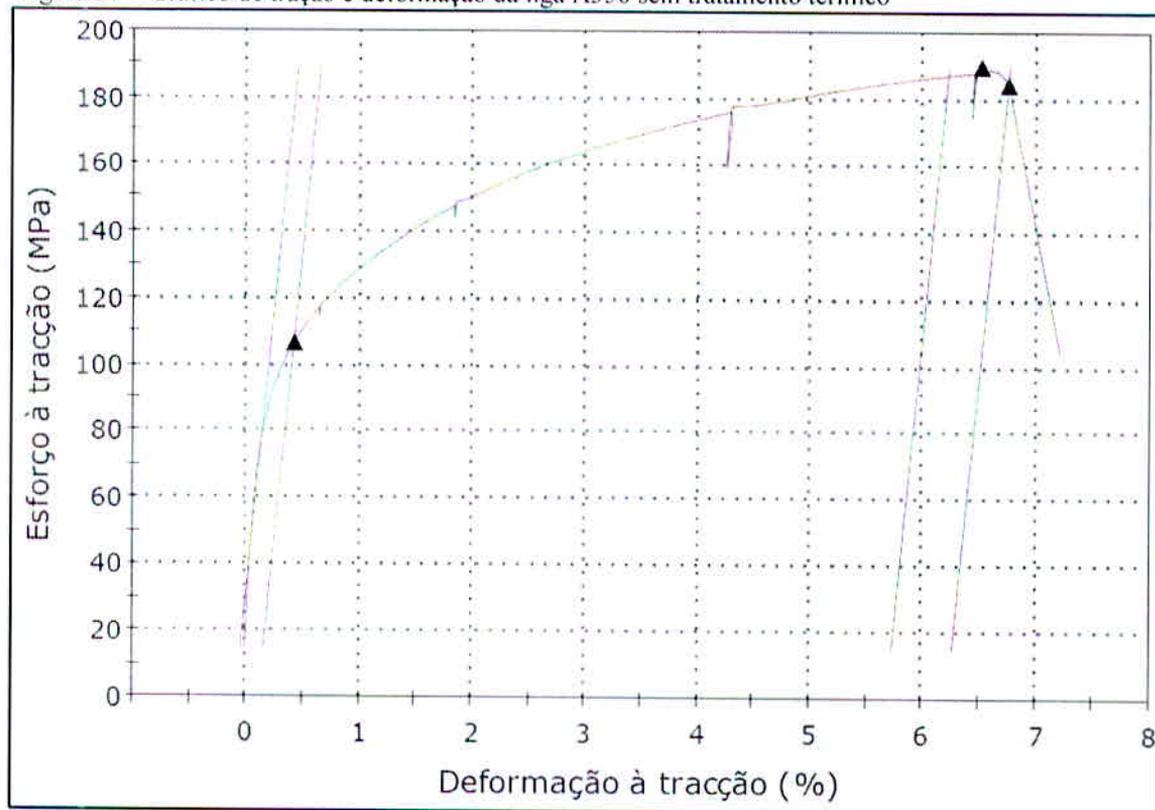
4 RESULTADOS E DISCUÇÕES

4.1 Ensaio de tração

Após os ensaios de tração que foram realizados nos dois corpos de prova, sendo um tratado termicamente e outro sem tratamento térmico, os resultados deixam claro a influencia positiva que o tratamento térmico T6 traz para o alumínio fundido em liga A356.

O primeiro corpo de prova testado foi sem tratamento térmico, os resultados podem ser vistos abaixo.

Figura 27 – Gráfico de tração e deformação da liga A356 sem tratamento térmico



Fonte: (O AUTOR)

Os valores encontrados para propriedades mecânicas podem ser vistos na tabela 10

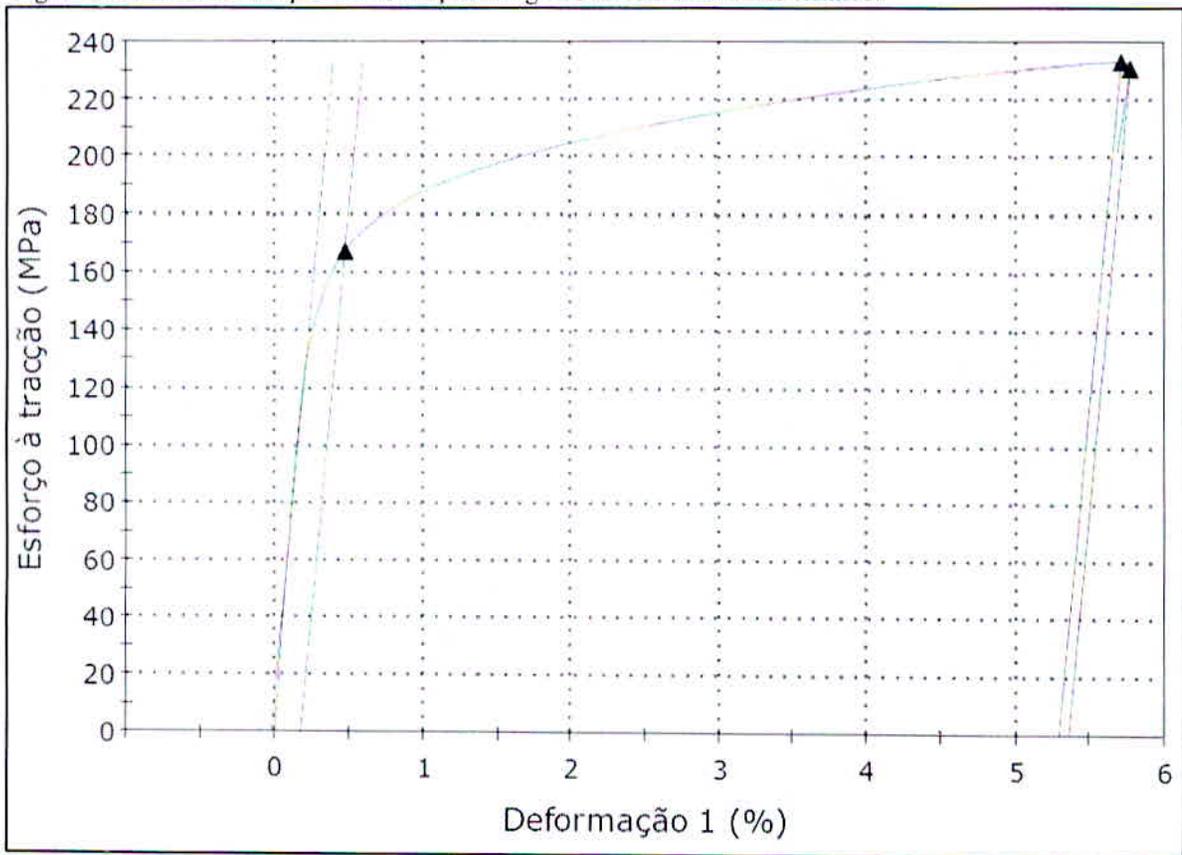
Tabela 10 – Propriedades mecânica do corpo de prova sem tratamento térmico

Alongamento (%)	Resistencia a tração (Mpa)	Limite de escoamento (Mpa)	Carga máxima (N)	Carga de ruptura (N)
7,2	189,5	106,7	5271,5	5157,4

Fonte: O autor

O segundo corpo de prova testado foi tratado termicamente, os resultados podem ser vistos abaixo.

Figura 28 - Gráfico de tração e deformação da liga A356 com tratamento térmico.



Fonte: (O AUTOR)

Os valores encontrados referentes às propriedades mecânicas podem ser vistos na tabela a seguir.

Tabela 11 – Propriedades mecânica do corpo de prova tratado termicamente

Alongamento (%)	Resistência a tração (Mpa)	Limite de escoamento (Mpa)	Carga máxima (N)	Carga de ruptura (N)
5,7	233,1	167,3	6461,2	6394,1

Fonte: O autor

Após analisar os resultados, verifica-se que o corpo de prova sem tratamento térmico não atingiu o mínimo necessário para aprovação, a amostra apresentou apenas 189,5 Mpa de resistência a tração. Apesar de ter tido um alongamento aprovado de 7,2 %, o limite de escoamento, também não teve um resultado satisfatório, com apenas 106,7 Mpa ficou quase no limite mínimo de aprovação. Sendo assim, conclui-se que a liga de alumínio A356 não

atende com segurança os limites mínimos de propriedades mecânicas, sendo necessária a aplicação do tratamento térmico T6 para que a liga atenda os valores de referência da solicitados pela norma.

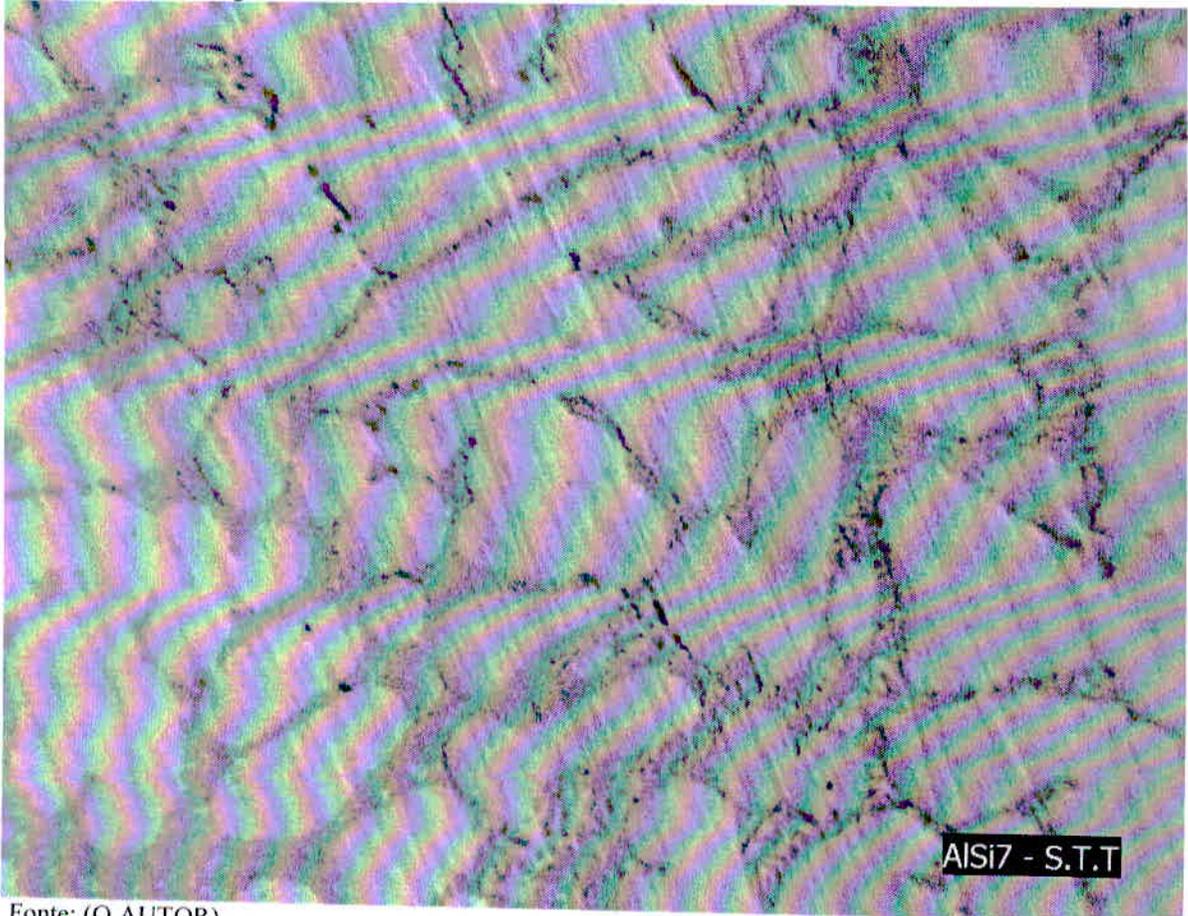
4.2 Metalografia.

Após todo o procedimento necessário para se fazer uma boa metalografia, foi possível avaliar os resultados através das imagens obtidas através do microscópio.

Conforme já foi abordado anteriormente neste trabalho, as morfologias necessárias para a aprovação do material deve ser fibrosa ou lamelar, descartando sempre a morfologia acicular.

A morfologia encontrada no material analisado sem tratamento térmico foi a fibrosa. Desta maneira o material mesmo sem tratamento térmico teve um resultado aprovado. Ver figura 31.

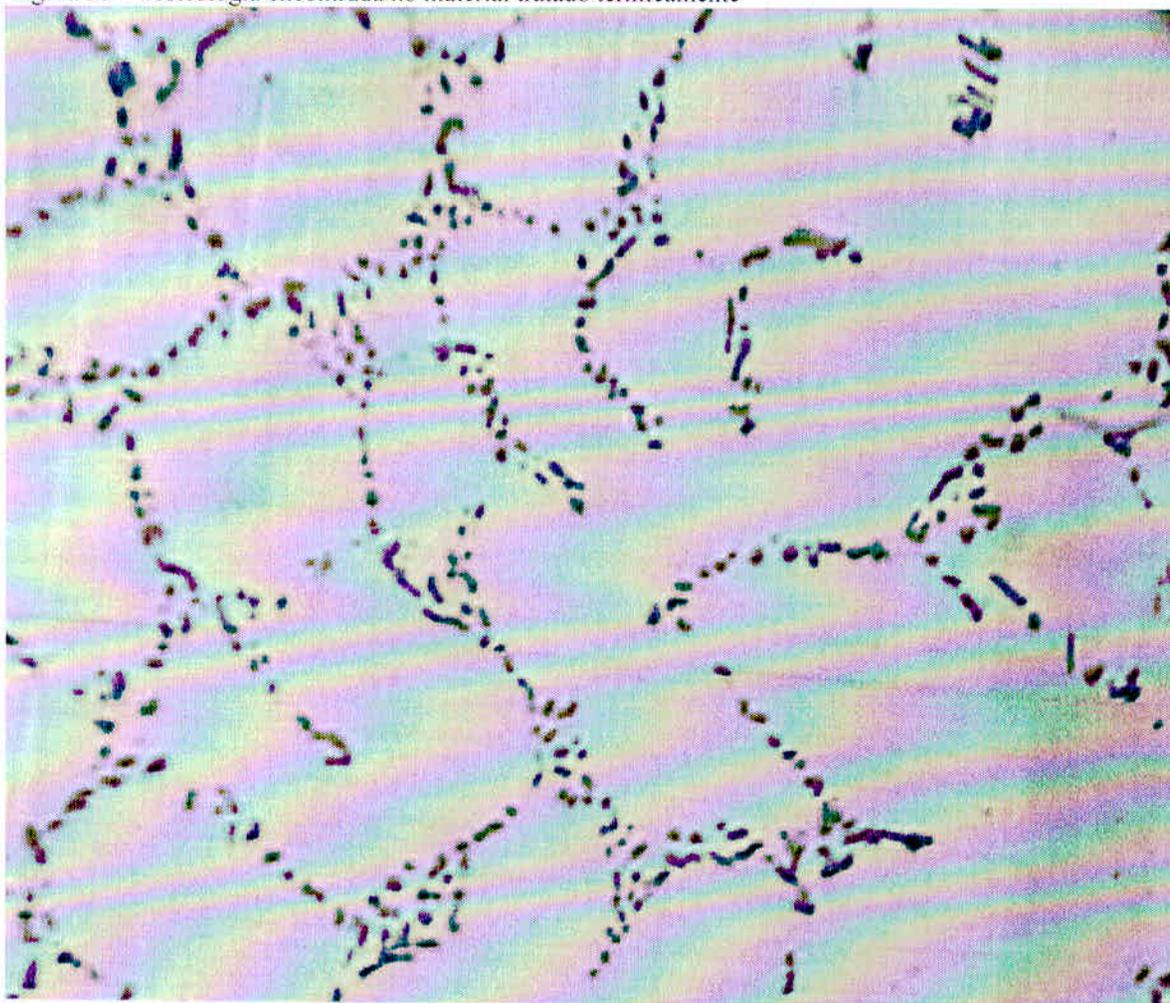
Figura 29 – Morfologia encontrada no material sem tratamento térmico



Fonte: (O AUTOR)

Logo após a análise do material sem tratamento, foi analisado o material que passou pelo tratamento térmico. Assim como a amostra que não sofreu tratamento térmico, o material tratado termicamente também apresentou uma morfologia fibrosa. Ver figura 32.

Figura 30 – Morfologia encontrada no material tratado termicamente



Fonte: (O AUTOR)

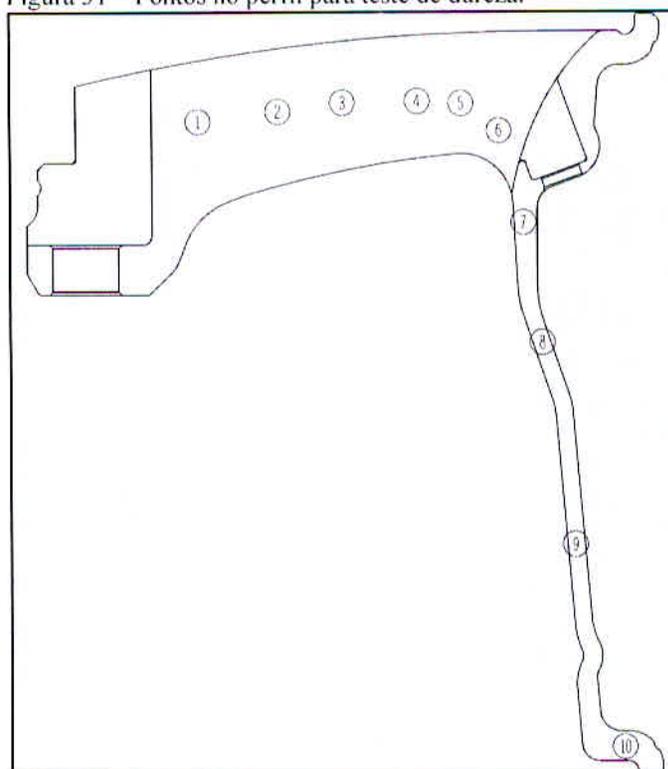
Com os resultados encontrados após a metalografia, verificamos que o tratamento térmico não influenciou no resultado. Logo, tanto o modelo tratado termicamente quanto o modelo sem tratamento térmico foram aprovados no quesito morfologia.

4.3 Teste de dureza

A liga A356 precisa alcançar um nível de dureza que satisfaça os valores descritos pela norma tomada como referência para este trabalho. Conseqüentemente o limite mínimo para dureza é de 60 HB.

O teste de dureza foi realizado em 10 pontos diferentes em cada perfil. Ver figura 32.

Figura 31 – Pontos no perfil para teste de dureza.



Fonte: (O AUTOR)

O primeiro perfil testado foi sem tratamento térmico, os resultados de dureza podem ser vistos na tabela a seguir.

Tabela 12 – Dureza no perfil

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
61,5	62,5	60,2	60,1	59,2	59,8	59,8	59,7	60,5	61

Fonte: O autor

Logo em seguida o perfil tratado termicamente também foi testado no durômetro, os resultados podem ser vistos na tabela a seguir.

Tabela 13 – Dureza no perfil

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75	74	74,5	74,1	76,2	77,1	77,3	77,2	77,4	77,3

Fonte: O autor

De acordo com os resultados obtidos no teste de dureza fica visível que o material sem tratamento térmico não atingiu o valor mínimo de 60 HB em determinados pontos, neste caso o material deve ser julgado como reprovado no quesito dureza. Já o perfil que passou pelo tratamento térmico, superou com folga o limite mínimo pré-estabelecido, logo, o material tratado termicamente está aprovado.

4.4 Ensaio de fadiga axial

Após os 150.000 ciclos pré-estabelecidos para o teste, foi realizada uma verificação nos parafusos de fixação da roda para se obter o valores de perda de torque. Logo em seguida a verificação de aperto dos parafusos, a roda testada foi submetida a um ataque químico denominado liquido penetrante. Com esse ataque químico, é possível verificar se houve trincas na roda.

Primeiramente foi analisada a roda sem tratamento térmico. Os resultados para perda de torque podem ser vistos na tabela abaixo:

Tabela 14 – Perda de torque por furo

Furos	1	2	3	4
Toque antes do teste	110	110	110	110
Torque após o teste	108	108	108	107

Fonte: O autor

Após o ataque químico realizado por liquido penetrante, visualizou-se que a roda testa não sofreu trincas e foi aprovada no teste de fadiga axial. Ver figuras 32 e 33.

Figura 32 – Roda aprovada, região do design.



Fonte: (O AUTOR)

Figura 35 – Roda aprovada, região do cubo.



Fonte: (O AUTOR)

De acordo com os resultados obtidos no teste de fadiga radial, pode-se observar que não houve perda de torque excessiva nos parafusos de fixação e também não foi observado trincas nas rodas. Sendo assim, tanto a roda testada sem tratamento térmico quanto a roda tratada termicamente, foram aprovadas no teste.

4.5 Ensaio de fadiga radial

Após os 1.500.000 ciclos pré-estabelecidos para o teste, foi realizado uma verificação nos parafusos de fixação da roda para se obter o valores de perda de torque. Logo em seguida a verificação de aperto dos parafusos, a roda testada foi submetida a um ataque químico denominado liquido penetrante. Com esse ataque químico, é possível verificar se houve trincas na roda.

Primeiramente foi analisada a roda sem tratamento térmico. Os resultados para perda de torque podem ser vistos na tabela abaixo:

Tabela 16 – Perda de torque por furo

Furos	1	2	3	4
Toque antes do teste	110	110	110	110
Torque após o teste	107	707	108	109

Fonte: O autor

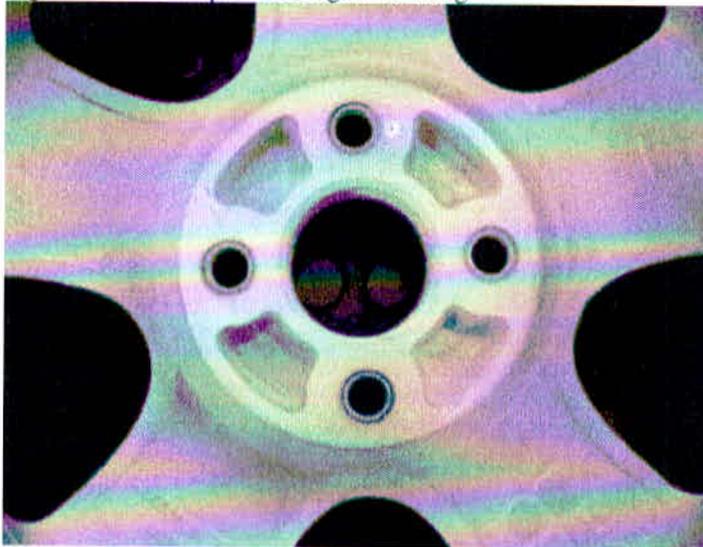
Após o ataque químico realizado por líquido penetrante, visualizou-se que a roda testa não sofreu trincas e foi aprovada no teste de fadiga axial. Ver figuras 36 e 37.

Figura 36 – Roda aprovada, região do design.



Fonte: (O AUTOR)

Figura 37 – Roda aprovada, região do design.



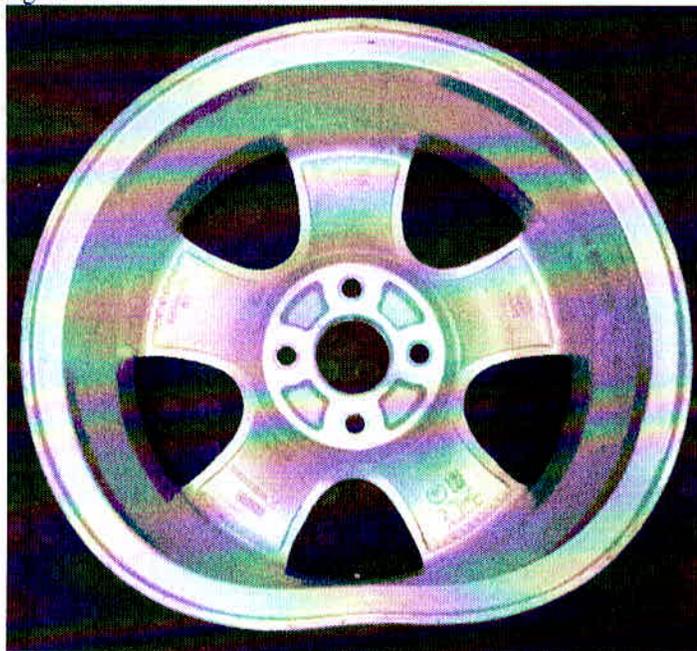
Fonte: (O AUTOR)

Como se pode ver nos resultados mostrados, verificou-se que não houve perda de torque excessiva nos parafusos de fixação e também não foi observado trincas nas rodas. Sendo assim, tanto a roda testada sem tratamento térmico quanto a roda tratada termicamente, foram aprovadas no teste de fadiga radial.

4.6 Teste de impacto a 90°

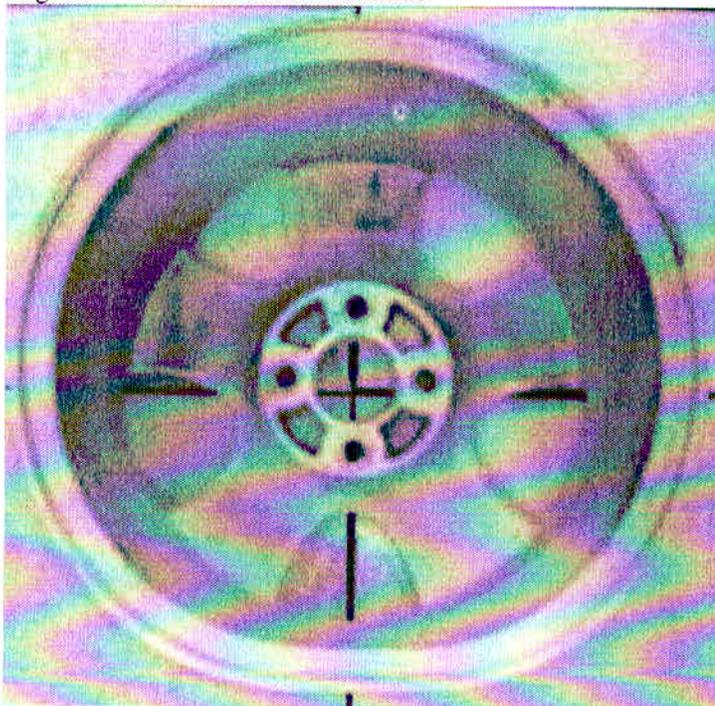
Após a realização do teste de impacto a 90° nas duas rodas, verificou-se que tanto a roda sem tratamento térmico quanto a roda tratada termicamente, não sofreram quebra e nem tiveram partes separadas. Ver figuras 38 e 39.

Figura 38 – Roda sem tratamento térmico



Fonte: (O AUTOR)

Figura 39 – Roda tratada termicamente

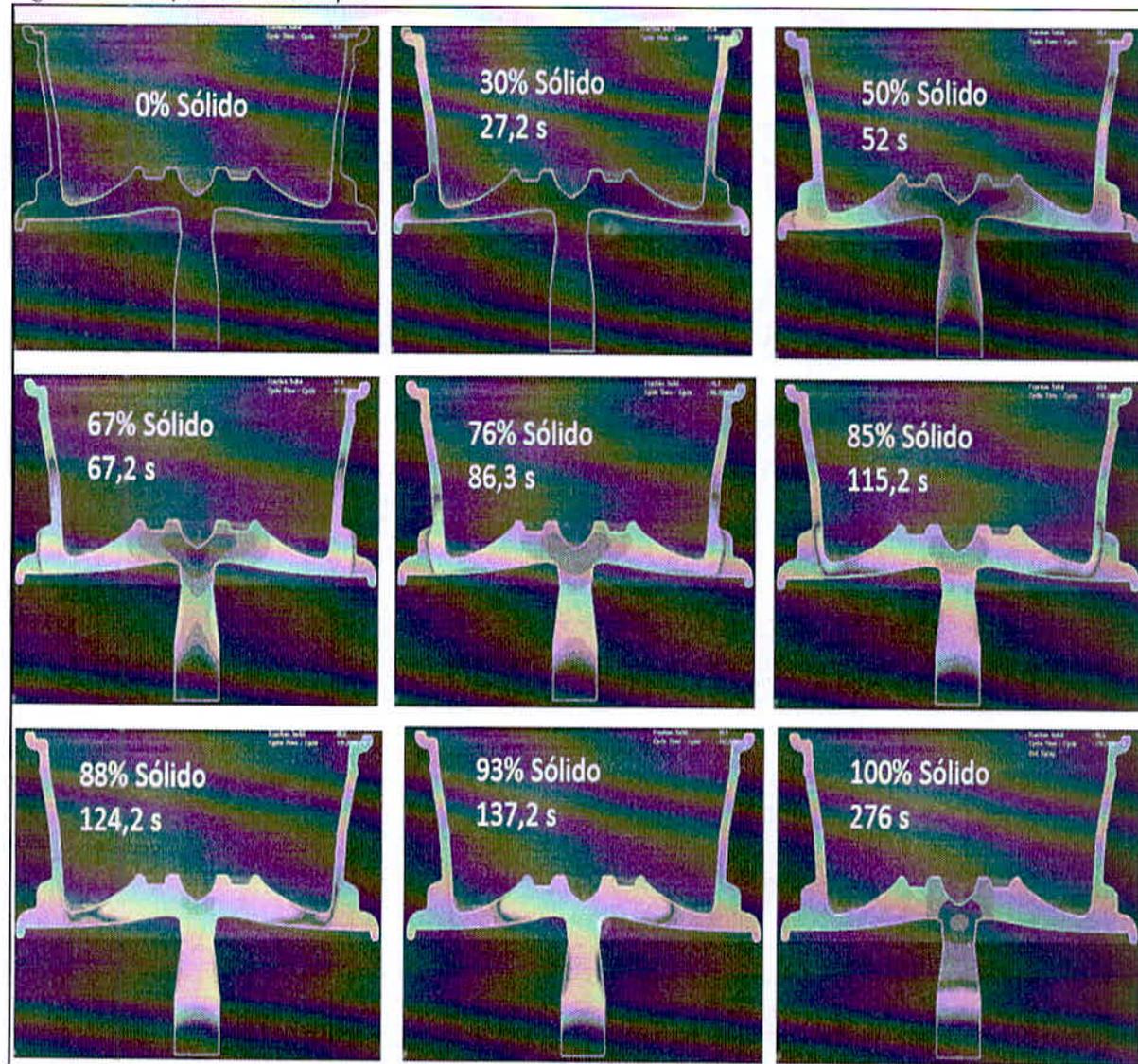


Fonte: (O AUTOR)

4.7 Análise de solidificação

Após a realização das simulações no software, tivemos os seguintes resultados para a variação da solidificação com o tempo. Também foi realizada uma análise dos pontos onde possivelmente possa surgir porosidade.

Figura 40 – Fração de solidificação



Fonte: (SOFTWARE PROCAST)

Com esta simulação podemos ver como se comporta a solidificação da roda tomada como modelo. Verifica-se também que após 276 segundos, a roda encontra-se 100% sólida dentro do molde.

A fração de solidificação de 50% a 53 segundos, chama a atenção por mostrar um ponto com solidificação atrasada. Ver imagem 41.

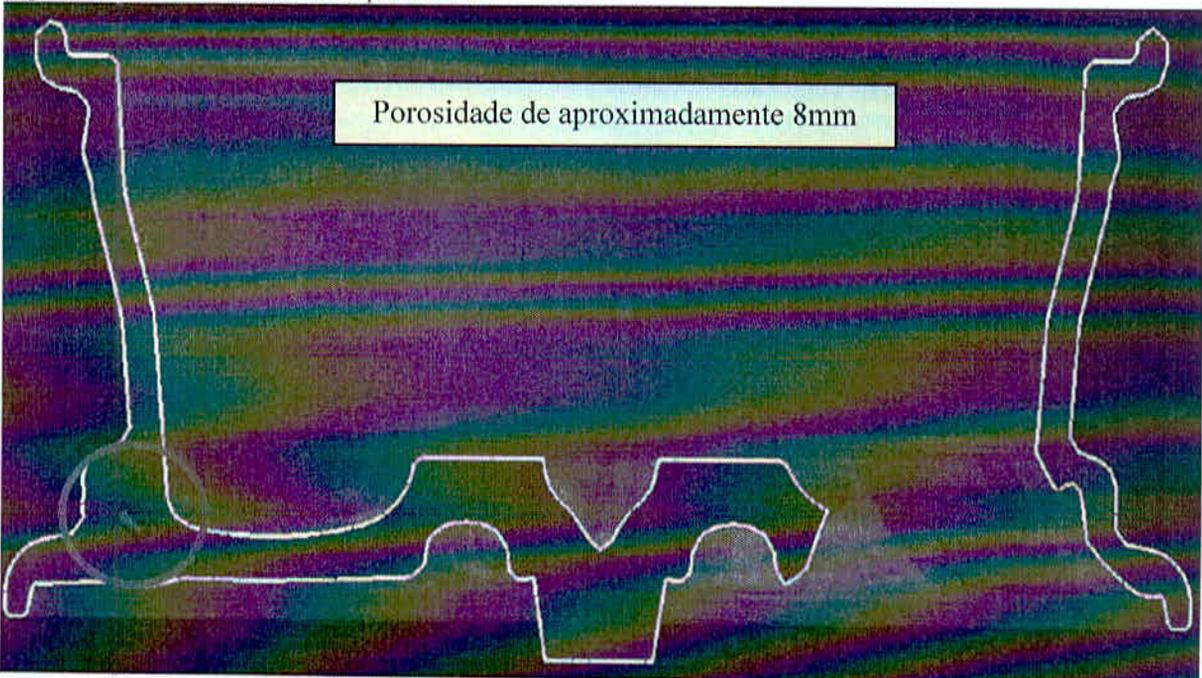
Figura 41 – Ponto com solidificação atrasada



Fonte: (O AUTOR)

O ponto em destaque na figura mostra uma região onde terá grandes possibilidades de haver porosidade. Na figura 42, podemos dimensionar teoricamente o tamanho do poro que possivelmente surgirá na região.

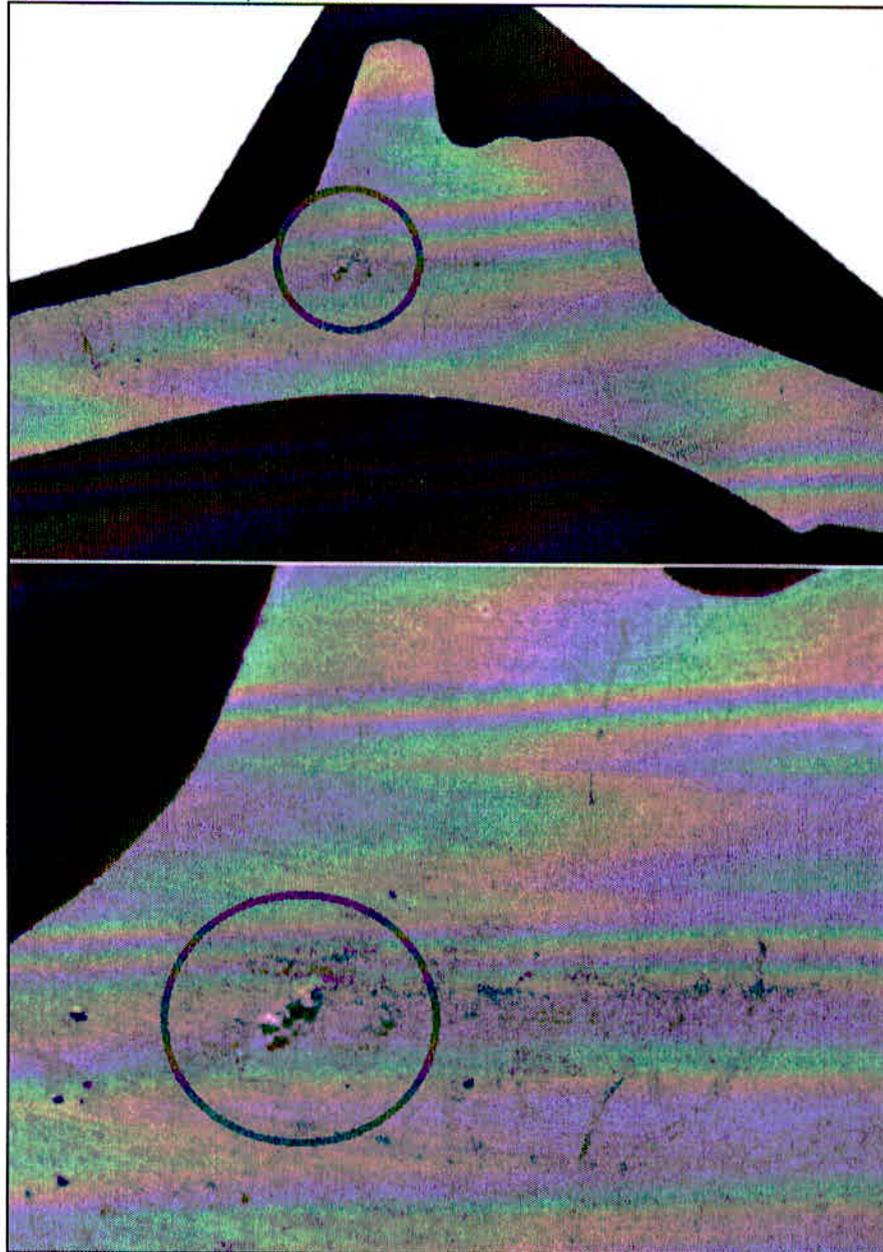
Figura 42 – Dimensionamento da porosidade



Fonte: (O AUTOR)

A próxima imagem demonstra um perfil que foi retirado da região onde as simulações indicam a possibilidade de surgimento de porosidade.

Figura 43 – Perfil com porosidade.



Fonte: (O AUTOR)

Os círculos vermelhos nas imagens acima apontam problemas de porosidade na peça. A região que apresentou poros coincide perfeitamente com a região destacada nas simulações de solidificação.

Com as simulações apresentadas, está claro como alguns problemas como a porosidade, podem ser vistos antecipadamente. Deste modo, as tomarem as devidas medidas para tentarem solucionar um problema antes que ele apareça nos testes com as peças físicas.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo falar sobre a liga A356 aplicada ao processo de liga leve, mostrar o desempenho da liga durante os testes realizados, realizar um estudo sobre a influência que o tratamento térmico gera nos resultados dos testes e também apresentar uma simulação para ilustrar a fração de solidificação da liga dentro do molde.

No início deste trabalho foi falado que o tratamento térmico é uma etapa muito importante durante o processo de fabricação, porém gera impactos negativos, tanto no processo quanto no produto final. Seria muito interessante financeiramente para a empresa e para o consumidor, eliminar esta etapa do processo de fabricação, porém não é tão simples assim. Os resultados obtidos durante este trabalho mostraram que o tratamento térmico tem papel importantíssimo para a liga no quesito propriedades mecânica, ele é responsável por tornar o material aprovado nos testes de tração e dureza. Durante o teste de tração o corpo de prova sem tratamento térmico apresentou pouca resistência a tração e baixo limite de escoamento comparado com os valores mínimos necessários para a aprovação, já o corpo de prova tratado termicamente apresentou boas propriedades mecânicas e foi aprovado. O mesmo aconteceu no teste de dureza, o material sem tratamento térmico apresentou regiões com níveis de dureza que não atendem os valores mínimos solicitados, porém o material tratado termicamente mostrou níveis de dureza bem acima do especificado por norma, sendo assim, aprovado com certa folga. Nos outros testes, o tratamento térmico não causou influências negativas nos resultados dos ensaios de fadiga radial, fadiga axial, teste de impacto e metalografia, tanto a amostra sem tratamento térmico quanto a tratada termicamente foram aprovadas.

Deste modo, fica claro que para a aprovação com segurança de uma roda de alumínio fundida em liga A356, as mesmas precisam passar pelo tratamento térmico T6 para alcançarem níveis satisfatórios de propriedades mecânicas.

Com as simulações de solidificação da roda dentro do molde, pode analisar o ciclo necessário para se obter uma roda bruta. Paralelamente, foi observado pontos onde são mais propícios a apresentar porosidade na roda fundida, possibilitando assim, ações preventivas dos projetistas para se evitar problemas com porosidade.

Enfim, o trabalho mostrou a aplicação da liga de alumínio no processo de produção de rodas de liga leve, deixou clara a importância que o tratamento térmico tem para a liga aplicada para esse fim e, com um breve estudo sobre a solidificação do alumínio, mostrou que é possível antecipar soluções para problemas com porosidades.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed.. São Paulo: McGraw-Hill Ltda, 1986.

FUOCO, Ricardo; CORRÊA, E.R; CORRÊA, A. V. O. **Processo de fabricação e defeitos típicos em rodas fundidas de alumínio**.

FURLAN, T.S. **Influencia do teor de estrôncio na modificação da liga A356**. 2008. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Fundação Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

LIMA, N.A.G. **Tratamento térmico de envelhecimento da liga de fundição AlSi10Mg(Fe)**. 2012. 60 f. Dissertação (Mestrado integrado em engenharia metalúrgica e de materiais) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

NBR 13909: Rodas e aros de veículos rodoviários e agrícolas. ABNT, 2012, setembro.

NBR 6752: Roda de liga de alumínio para automóveis comerciais leves e utilitários esportivos – Ensaio de verificação de desempenho. ABNT, 2012, setembro.

NETO, E.F.B. **Testes de fadiga de rodas veiculares – proposta de estabelecimento, para os testes em laboratório dos carregamentos que simulem o ocorrido no teste de durabilidade estrutural de veículo em pista**. 2010. 104 f. (Mestrado em engenharia) – Escola politécnica de São Paulo, São Paulo, 2010.

OLIVEIRA, G.R.G. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn**. 2012. 61 f. Mestrado integrado em engenharia metalúrgica e de materiais) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

Vaska. **Fundição**. Disponível em: < <http://www.vaska.com.br/apvk.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

Volcanowheels. **Manual técnico**. Disponível em: <http://www.volcanowheels.com/manual_tecnico>. Acesso em: 16 jan. 2014.