

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JAMES LIMA IANSEN

**VIDA EM FADIGA DA LIGA DE ALUMÍNIO A380.0 FUNDIDO EM MOLDE PERMANENTE SOB GRAVIDADE COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE VIBRAÇÃO NA SOLIDIFICAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

**JAMES LIMA IANSEN**

**VIDA EM FADIGA DA LIGA DE ALUMÍNIO A380.0 FUNDIDO EM MOLDE  
PERMANENTE SOB GRAVIDADE COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE  
VIBRAÇÃO NA SOLIDIFICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Profa. Ma. Silvana Patricia Verona

**PATO BRANCO**

**2017**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### VIDA EM FADIGA DA LIGA DE ALUMÍNIO A380.0 FUNDIDO EM MOLDE PERMANENTE SOB GRAVIDADE COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE VIBRAÇÃO NA SOLIDIFICAÇÃO

James Lima Iansen

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 07/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Profa. Dra. Maria Nalu Verona  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Dalmarino Setti  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Profa. Ma. Silvana Patricia Verona  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)  
Orientadora

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

## **AGRADECIMENTOS**

A minha orientadora professora Ma. Silvana Patricia Verona, pela amizade, conhecimento, paciência, apoio e confiança depositada em mim para realização e direcionamento deste trabalho.

Ao técnico de laboratório de usinagem Vitor Baldin, pela colaboração, paciência, empenho e disponibilidade de tempo no auxílio para fabricação dos corpos de prova e realização dos ensaios.

A acadêmica Laura Ferrazza Kirch, por realizar a fundição e doação do material para ensaio, contribuindo no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Sérgio Luiz Ribas Pessa, que de forma indireta, contribuiu na indicação da professora orientadora Ma. Silvana Patricia Verona para o desenvolvimento deste trabalho.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Pato Branco, pela disponibilidade dos laboratórios tanto na fabricação dos corpos de prova quanto do ensaio, disponibilizando materiais e equipamentos necessários.

A uma pessoa em especial para mim nessa caminhada, Naiane Miriam Malherbi, que sempre me apoiou, incentivou e contribuiu de forma direta em toda a minha graduação.

A meus pais, Nilton José Iansen e Ana Maria Lima Iansen, meu irmão, Jacques Lima Iansen, que de forma especial e carinhosa me deram apoio e suporte durante toda minha vida, e com isso, o privilégio de poder estudar.

A todos os familiares, amigos, professores e colegas, pelos momentos de alegria, descontração, amizade e que contribuíram direta ou indiretamente para a execução deste trabalho: Muito obrigado!

*“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar.  
É melhor tentar, ainda que em vão que sentar-se, fazendo nada até o final. Eu  
prefiro na chuva caminhar, que em dias frios em casa me esconder.  
Prefiro ser feliz embora louco, que em conformidade viver”*

*(Martin Luther King)*

## RESUMO

IANSEN, James Lima. Vida em fadiga da liga de alumínio A380.0 fundido em molde permanente sob gravidade com diferentes condições de vibração na solidificação. 2017. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho teve por objetivo a verificação da influência da vibração na solidificação na vida em fadiga da liga A380.0 fundida em molde permanente sob gravidade sob a influência da vibração na solidificação para analisar os efeitos do processo de fabricação nas propriedades do material. O estudo apresentou conceitos de fadiga, ensaios de flexão-rotativa, processo de fundição, assim como uma abordagem da liga Al A380.0. Os resultados mostraram uma dispersão do número de ciclos para variações crescentes de tensão aplicadas a cada corpo de prova ensaiado, conforme apresentado na literatura.

**Palavras-chave:** Fadiga. Flexão-rotativa. Processo de fabricação.

## ABSTRACT

IANSEN, James Lima. Fatigue life of A380.0 aluminum alloy cast in permanent mold under gravity with different vibration conditions during solidification. 2017. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Course of Mechanical Engineering, Technical University Federal of Parana. Pato Branco, 2017.

The objective of this work was to verify Influence of vibration on the solidification in fatigue life of the A380.0 alloy cast in permanent mold under gravity under the influence of vibration in the solidification to analyze the effects of the manufacturing process on the properties of the material. The study presented concepts of fatigue, flexural-rotary tests, casting process, as well as an Al A380.0 alloy approach. The results showed a dispersion of the number of cycles for increasing voltage variations applied to each specimen tested, as presented in the literature.

**Keywords:** Fatigue. Flexion-rotating. Manufacturing process.

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sistema de designação de alumínio fundidos .....	34
Quadro 2 - Composição nominal e processo de fundição de algumas ligas de alumínio fundidas .....	35
Quadro 3 - Composição Química da Liga A380.0 .....	37
Quadro 4 - Propriedades da Liga A380.0 sem vibração e com vibração de 2 bar ....	37
Quadro 5 - Composição química da amostra após fundição da liga A380.0 conforme (AA) .....	39
Quadro 6 - Tensões alternantes e número de ciclos .....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aspecto da superfície de fratura de um material metálico .....	17
Figura 2 - Ação corrosiva de um meio químico em um par de engrenagens .....	18
Figura 3 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos .....	19
Figura 4 - Ciclos regulares de tensões .....	20
Figura 5 - Duas peças que falharam sob fadiga: (a) Eixo com rasgo de chaveta de aço 1040 que falhou sob flexão rotativa. (b) Eixo de manivela de um motor diesel que falhou sob torção e flexão combinadas .....	21
Figura 6 - Gráfico de um ciclo de tensão .....	22
Figura 7 - Curva de Wöhler .....	24
Figura 8 - Curva S-N, resposta típica do ensaio de fadiga para materiais ferrosos e não-ferrosos .....	25
Figura 9 - Categorias do ensaio de fadiga .....	28
Figura 10 - Solicitação de flexão para o ensaio de flexão rotativa .....	29
Figura 11 - Esquema de uma máquina de injeção sob pressão do tipo câmara fria .....	30
Figura 12 - Molde metálico .....	32
Figura 13 - Esquema de uma máquina de baixa pressão .....	33
Figura 14 - Microestruturas referentes às amostras obtidas a) sem vibração e b) com vibração de 2 bar de pressão .....	38
Figura 15 - Corpo de prova acabado .....	39
Figura 16 - Máquina para testes de fadiga de vigas rotativas .....	40
Figura 17 - Falha do corpo de prova .....	43
Figura 18 - Curva de Wöhler para pressão de vibração a 0,5 bar .....	44
Figura 19 - Curva de Wöhler para pressão de vibração a 1,5 bar .....	45
Figura 20 - Curva de Wöhler para pressão de vibração a 3 bar .....	46
Figura 21 - Análise da fratura .....	47

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	15
2.1 OBJETIVOS GERAIS .....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....	17
3.1 CONCEITOS SOBRE FADIGA .....	17
3.1.1 Início da trinca .....	18
3.1.2 Propagação da trinca .....	19
3.1.3 Ruptura do material .....	21
3.2 CICLO DE TENSÕES .....	21
3.2.1 Fator de superfície .....	22
3.2.2 Fator de tamanho .....	23
3.2.3 Fator de confiabilidade .....	23
3.2.4 Fator de geometria .....	23
3.2.5 Fator de temperatura .....	23
3.2.6 Fator de carga .....	24
3.3 MODELOS DE FALHA POR FADIGA .....	24
3.3.1 Métodos de ensaio de fadiga .....	26
3.3.1.1 Método de estimativa de curva .....	26
3.3.1.2 Método de tensão constante .....	26
3.3.1.3 Método da sobrevivência .....	26
3.3.1.4 Método <i>Staircase</i> .....	27
3.3.2 Ensaio de fadiga .....	27
3.3.2.1 Ensaio de Flexão rotativa .....	28
3.4 PROCESSOS DE FUNDIÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO .....	29
3.4.1 Processo de fundição sob pressão .....	30

3.4.2 Processo de fundição em molde permanente sob gravidade.....	31
3.4.3 Processo de fundição em baixa pressão.....	32
3.4.4 Efeito da vibração na solidificação e nas propriedades do metal no processo de fundição.....	33
<b>3.5 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS .....</b>	<b>33</b>
3.5.1 Ligas Al – Si (série 300) .....	36
3.5.2 Liga de alumínio A380.0.....	36
3.5.3 Propriedades mecânicas e microestrutura da liga A380.0 .....	37
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
4.1 MATERIAIS .....	39
4.2 EQUIPAMENTOS .....	40
4.3 MÉTODOS .....	41
4.3.1 Cálculo da tensão alternante.....	41
4.3.2 Freqüência dos ciclos de tensão .....	41
4.3.3 Apresentação dos resultados .....	42
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA A380.0 PELA CURVA DE WÖHLER.....	43
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO A - PROGRAMA PARA USINAGEM CNC DO CORPO DE PROVA .....</b>	<b>53</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Em componentes fundidos, defeitos internos (cavidades de microrechupes e crateras) e impurezas são responsáveis na maioria das vezes por falhas de fadiga devido a um processo de fundição não otimizado. Por meio destes defeitos ou impurezas, o limite de fadiga de materiais fundidos precisa ser avaliado e conhecido.

A fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a um carregamento repetitivo e a vibração como, por exemplo, pontes, aeronaves, componentes de máquinas, compressores, bombas e turbinas (CALLISTER, 2002). “Desde 1850, é conhecido o fato de que um metal submetido a uma tensão repetida ou flutuante romperá a uma tensão muito inferior àquela necessária para ocasionar fratura devido à aplicação de uma carga estática” (DIETER, 1981).

Dentre as diversas causas de falhas de componentes mecânicos, a falha por fadiga do material é a mais freqüente. É responsável de 50% a 90% do número total de falhas em materiais metálicos, que ocorrem na maioria das vezes de forma inesperada, súbita, portanto bastante perigosas (FREDEL, 2015). “Uma falha por fadiga ocorre dentro de uma gama bastante ampla de ciclos de carga, desde valores da ordem de 10 ciclos até mais de  $10^7$ ,  $10^8$  ciclos” (ROSA, 2012).

Materiais cerâmicos e poliméricos estão sujeito a ruptura por fadiga, mas são caracterizados por outras condições de falha. Os cerâmicos por apresentarem baixa tenacidade à fratura, os poliméricos por terem seus mecanismos de fratura indefinidos (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008).

Devido aos esforços exigidos dos materiais desde a Segunda Guerra Mundial nas diversas aplicações, foram feitos investimentos em pesquisa científica no assunto, e, agora, compreende-se razoavelmente bem o fenômeno da fadiga, mas ainda existem questões a serem estudadas relacionadas ao mecanismo físico da fadiga em si (NORTON, 2013).

As falhas por fadiga constituem um custo significativo para a economia de um país, não somente como resultado de ocorrências e prevenção de falhas nos mais diversos ramos da indústria como no setor automobilístico, marítimo, aeronáutico, petrolífero, rodoviário, mas também envolvendo a vida humana.

Há uma série de normas que devem ser seguidas para a realização de ensaios e experimentos para se obter a caracterização dos materiais metálicos com a finalidade de padronização dos resultados. Destacam-se as normas internacionais elaboradas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e as elaboradas pela *International Organization for Standardization* (ISO).

O crescente uso das ligas de alumínio fundido na indústria deve-se ao fato de apresentarem boas propriedades mecânicas e físicas em relação a aços estruturais e materiais ferrosos. Em certas aplicações, as ligas de alumínio podem substituir materiais geralmente utilizados em componentes que exigem alta resistência, com boa eficiência e desempenho.

Porém, as ligas de alumínio fundidas podem ser fabricadas por diferentes tipos de fundição pela forma de vazamento do metal, podendo assim, ter suas propriedades alteradas.

O tema vida em fadiga da liga de alumínio A380.0 fundido em molde permanente sob gravidade com diferentes condições de vibração na solidificação foi determinado por ser um mecanismo de análise de diversos setores da indústria, que envolvem diferentes áreas da engenharia mecânica, onde se pode ter uma previsão da vida do material ou componente, permitindo também quantificar de uma forma bastante precisa os níveis admissíveis em que um componente com defeitos pode operar, sem que venha a falhar.

A importância dessa análise se dá ao fato de que se podem evitar manutenções equivocadas em componentes, interrupção drástica da produção por falha de componentes, proporcionar maior segurança aos componentes, além de reduzir custos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

Analisar vida em fadiga da liga de alumínio A380.0 fundida em molde permanente sob gravidade com diferentes condições de vibração na solidificação para verificar os efeitos do processo de fabricação nas propriedades do material.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Usinar os corpos de prova obtidos por fundição em molde permanente em diferentes condições de vibração na solidificação;
- Avaliar a vida em fadiga da liga A380.0.



### 3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

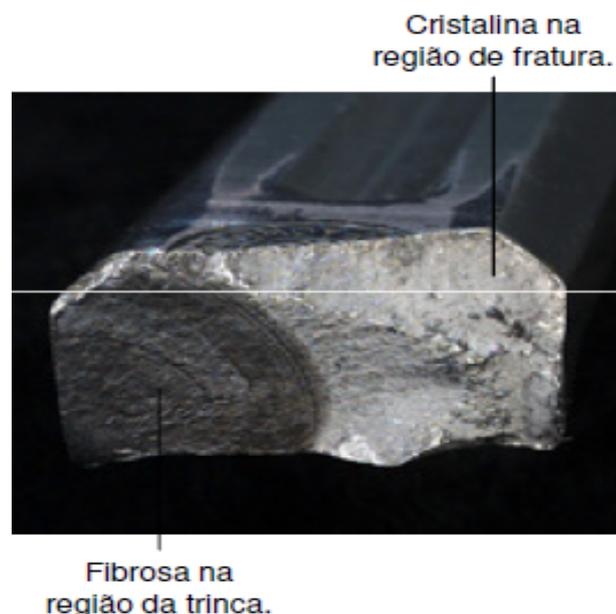
#### 3.1 CONCEITOS SOBRE FADIGA

O termo "fadiga" é usado, porque a falha ocorre normalmente após um longo período de tensão repetitiva ou ciclo de deformação (CALLISTER, 2002). Segundo Rosa (2012), a fadiga é a diminuição gradativa da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, resultado do avanço muito pequeno das fissuras formadas em seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões.

A fratura por fadiga tem aparência frágil, sem existência de deformação macroscópica na fratura. A superfície de fratura, em escala macroscópica, é quase sempre normal à direção da tensão principal de tração (DIETER, 1981).

A falha por fadiga pode ser reconhecida a olho nu a partir do aspecto da superfície de fratura que geralmente apresenta-se fibrosa na região da trinca e cristalina na região da ruptura (ENGBRASIL, 2016). A Figura 1 mostra o aspecto da superfície de fratura.

Figura 1 - Aspecto da superfície de fratura de um material metálico



Fonte: Adaptado de ENGBRASIL (2016).

A fratura por fadiga, na maioria das vezes é repentina e sem aviso prévio e em condições normais de operação, com tensões máximas abaixo do limite de escoamento do material. Em condições anormais de serviço, ou seja, com sobrecargas, ambiente corrosivos, entre outros, como mostrado na Figura 2, à possibilidade de falha por fadiga é aumentada (GOMES, 2011).

Figura 2 - Ação corrosiva de um meio químico em um par de engrenagens



Fonte: Adaptado de ENGBRASIL (2016).

A falha por fadiga é de natureza frágil, mesmo em metais dúcteis, no sentido de que existe muito pouca, ou nenhuma deformação plástica generalizada associada com a falha (CALLISTER, 2002).

Segundo Norton (2013, p.306), é essencial que peças carregadas dinamicamente sejam projetadas para minimizar a concentração de tensões. Há três estágios bem definidos na falha por fadiga: início da trinca (pequena duração); propagação da trinca (longo tempo de vida da peça) e; ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca (instantâneo) (NORTON, 2013).

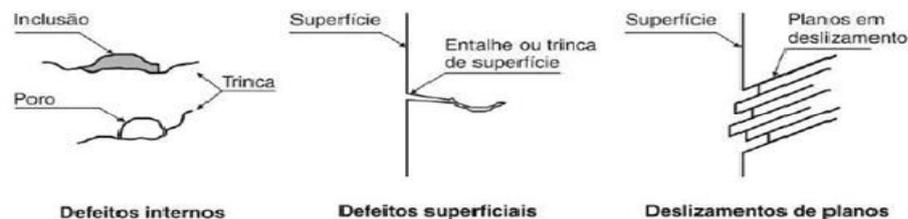
### 3.1.1 Início da trinca

As trincas associadas com falhas por fadiga geralmente nucleiam sobre a superfície de um componente em algum ponto de concentração de tensões (CALLISTER, 2002). Na maioria das vezes são gerados por trincas de usinagem, cantos em ângulo ou entalhe, pontos de corrosão, defeitos de solidificação (segregação), defeitos na estrutura cristalina devido a processos de conformação,

sendo todos esses os principais fatores para a nucleação de trincas na manufatura dos componentes (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008).

A presença de defeitos internos (inclusões ou porosidade) reduz o tempo de nucleação de trincas, devido esses defeitos apresentarem características de concentradores de tensão local (GARCIA; SPIM, SANTOS, 2008). A Figura 3 apresenta alguns dos fatores de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos.

Figura 3 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos



Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS, (2008).

Devido a movimentos cisalhantes, bandas de deslizamento formam-se ao longo dos contornos dos cristais do material (NORTON, 2013).

Materiais menos dúcteis tendem a desenvolver trincas mais rapidamente por não possuírem habilidade para escoar. Eles são mais sensíveis a entalhes. Materiais frágeis podem pular o estágio de desenvolvimento de trincas e avançar diretamente para a propagação da trinca em locais de existência de defeitos internos (NORTON, 2013).

### 3.1.2 Propagação da trinca

A trinca se propaga através de um processo repetitivo de abaulamento plástico e afilamento da ponta da própria trinca (CALLISTER, 2002).

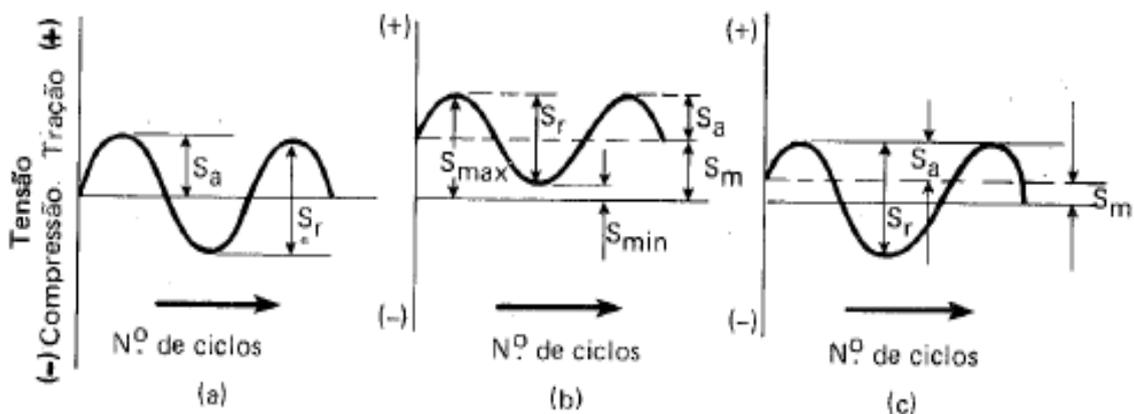
Quando há uma trinca desde o início ou ela se desenvolve microscopicamente, a mecânica da fratura se torna muito importante. A trinca mais

pontiaguda cria concentração de tensões superiores à proporcionada pelo entalhe original (NORTON, 2013).

Na transição do ciclo de tensão de fadiga para tensão de compressão ou para um valor nulo, respectivamente, a trinca fecha, o escoamento momentaneamente cessa e a trinca torna-se novamente pontiaguda, agora com um comprimento maior. Esse processo continua enquanto há variação de tensão local acima e abaixo da tensão de escoamento na ponta da trinca (NORTON, 2013).

“Um ciclo de tensão é a menor parte da função tensão-tempo que é periódica e identicamente repetida” (SOUZA, 1982). Na Figura 4, três dos diversos ciclos de tensões possíveis são mostrados.

Figura 4 - Ciclos regulares de tensões



Fonte: SOUZA, (1982).

Os ciclos da Figura 4 são completamente reversos de forma senoidal. Na Fig. 4(a) as tensões máximas e mínimas são iguais e de sinais opostos, sendo tensão de tração considerada positiva e tensão de compressão, negativa. A Fig. 4(b) as tensões são todas positivas, mas as tensões máximas e mínimas são desiguais. Já na Fig. 4(c) o ciclo possui tensões positivas e negativas e as tensões máximas e mínimas desiguais (SOUZA, 1982).

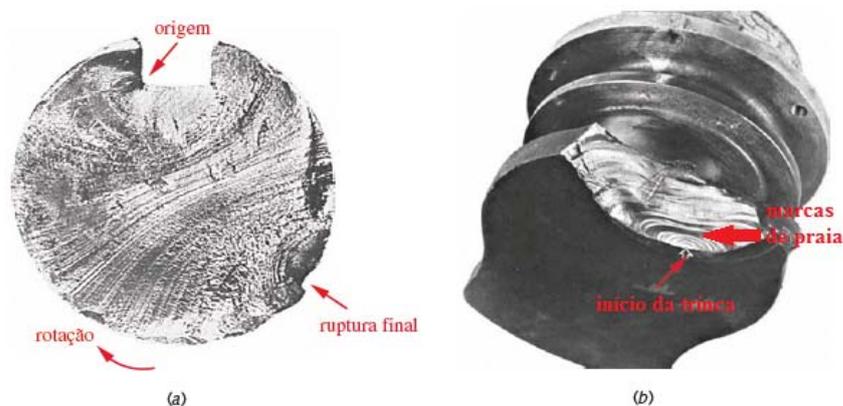
Tensões cíclicas de compressão não irão contribuir para o crescimento da trinca, pois tendem a fechá-la. Tensões de tração são responsáveis pelo crescimento da trinca que propaga-se ao longo de planos normais aos de tensão máxima de tração (NORTON, 2013).

### 3.1.3 Ruptura do material

A trinca continuará crescendo enquanto tensões de tração cíclicas e/ou fatores de corrosão estiverem presentes. Com o passar do tempo, a trinca chega a tal tamanho que, aumenta o fator de intensidade de tensão “K” na extremidade da trinca até o nível da tenacidade à fratura do material “K<sub>c</sub>”, causando a falha instantânea no próximo ciclo de tensão de tração (NORTON, 2013).

As marcas de praia que circundam a trinca podem ser vistas nas zonas de fratura. A zona de fratura frágil pode estar representada por uma pequena área que restou da seção transversal original da peça (NORTON, 2013). Peças que falharam sob fadiga podem ser vistas na Figura 5.

Figura 5 - Duas peças que falharam sob fadiga: (a) Eixo com rasgo de chave de aço 1040 que falhou sob flexão rotativa. (b) Eixo de manivela de um motor diesel que falhou sob torção e flexão combinadas

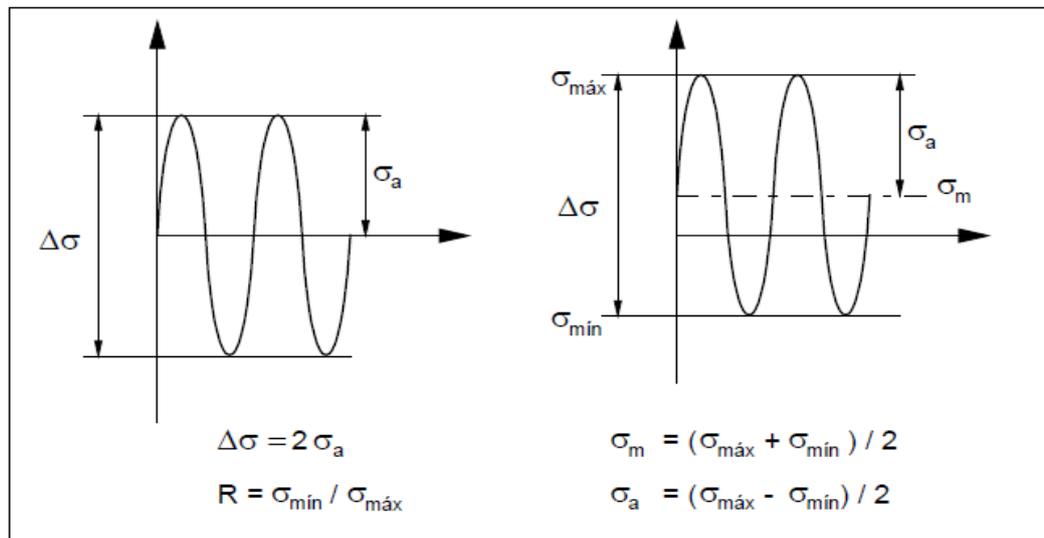


Fonte: NORTON, (2013).

### 3.2 CICLO DE TENSÕES

Qualquer um dos tipos de ciclo de tensões citados na Figura 6, pode ser caracterizado por meio de parâmetros de componentes média e alternada, valor máximo e mínimo ou por meio da razão desses valores (NORTON, 2013).

Figura 6 - Gráfico de um ciclo de tensão



Fonte: ROSA, (2012).

Para corpos de prova, o comportamento quanto à resistência à fadiga de um material analisado para cargas cíclicas é alternante devido sua simetria e uniformidade, ou seja, de média zero, e com amplitude constante, através do diagrama  $\sigma - N$  ou então do diagrama  $\varepsilon - N$ . Para um componente mecânico não é possível aplicar diretamente estes resultados devido vários aspectos que alteram a resistência à fadiga do componente quanto ao tipo de sollicitação, distribuição de tensão e fatores que afetam a resistência do material em relação aos resultados obtidos no ensaio com os corpos de prova (ROSA, 2012). Esses fatores são listados como:

### 3.2.1 Fator de superfície

O corpo de prova tem a sua superfície retificada ou muitas vezes polida, enquanto que o componente mecânico é apenas usinado, usado no estado bruto de fabricação, como de laminação, de forjamento, soldado ou de fundição (ROSA, 2012).

### 3.2.2 Fator de tamanho

O corpo de prova é em geral de pequeno diâmetro e volume de material solicitado pelas tensões máximas, reduzindo as heterogeneidades que podem existir no volume. Regiões centrais de peças de grande porte são mais sujeitas a segregações, inclusões e outros defeitos metalúrgicos, o que compromete a resistência da peça (ROSA, 2012).

### 3.2.3 Fator de confiabilidade

Há uma considerável dispersão de resultados no processo de falha por fadiga. Assim, o projeto deve usar os dados da resistência de fadiga com um nível de segurança que considere a dispersão existente, a tensão de resistência à fadiga deve ser corrigida por este efeito. Isto faz com que a tensão limite de fadiga fique abaixo do valor médio, para uma confiabilidade superior a 50% (ROSA, 2012).

### 3.2.4 Fator de geometria

Os corpos de prova são uniformes, com uma transição suave para os extremos onde são presos, enquanto que nos componentes mecânicos sempre existirão variações bruscas da geometria que acarretarão concentrações de tensão iniciando a falha (ROSA, 2012).

### 3.2.5 Fator de temperatura

Quando o componente projetado irá trabalhar em temperatura distinta à temperatura em que os ensaios de fadiga serão realizados é necessária uma correção na resistência à fadiga do material para adequá-la à temperatura de trabalho (ROSA, 2012).

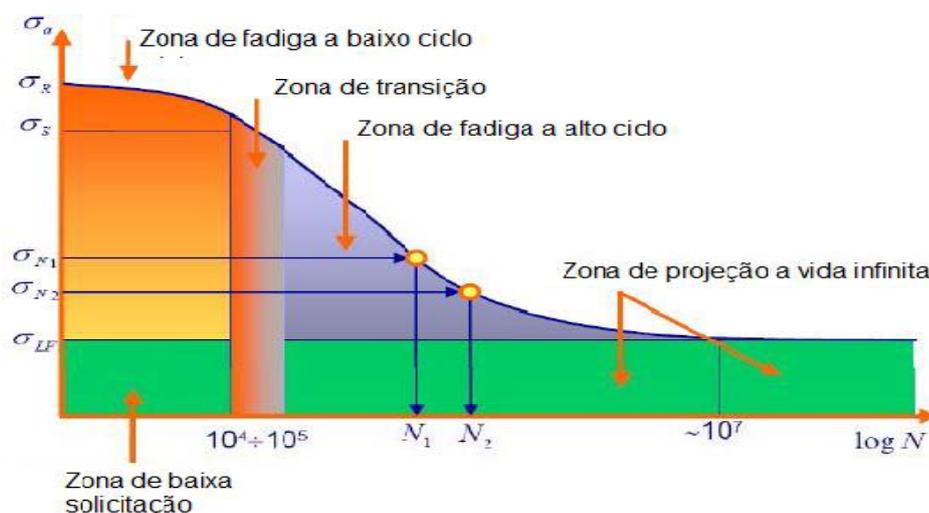
### 3.2.6 Fator de carga

Muitas vezes os ensaios de corpos de prova de fadiga a solicitação é simples, ou seja, de apenas um tipo de esforço aplicado. Para os componentes mecânicos reais normalmente existe vários tipos de solicitações, tornando necessária uma análise do efeito combinado (ROSA, 2012).

### 3.3 MODELOS DE FALHA POR FADIGA

Há três modelos de falha por fadiga em uso, e cada um possui uma aplicação e um propósito. As abordagens são: o modelo tensão-número de ciclos (S-N), o modelo deformação-número de ciclos ( $\epsilon$ -N) e o modelo da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) (NORTON, 2013). Com base no número de ciclos de tensão ou deformação, durante a vida em operação da peça, pode-se definir um regime de fadiga de baixo-ciclo (FBC) ou um regime de fadiga de alto-ciclo (FAC) (NORTON, 2013). A Figura 7 apresenta a curva de Wöhler (curva S-N) e suas zonas de fadiga de baixo e alto ciclo, zona de transição, zona de projeção a vida infinita, zona de baixa solicitação e a tensão de projeção para vida infinita.

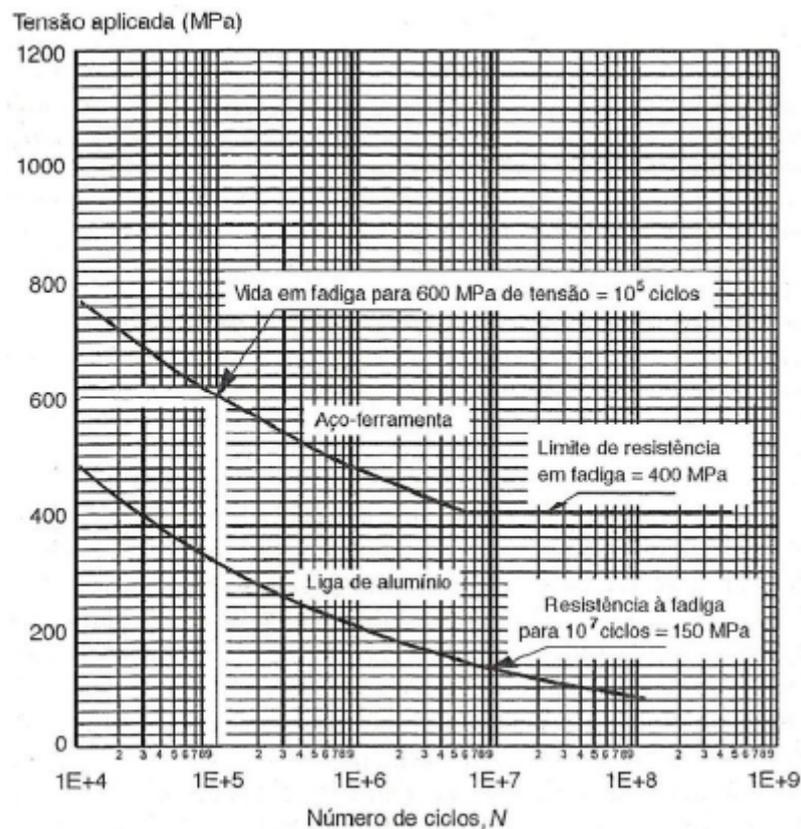
Figura 7 - Curva de Wöhler



Fonte: Adaptado de CDMUNICAS (2017).

Ligas não ferrosas (alumínio, cobre, magnésio etc.) não apresentam limite de resistência à fadiga (vida infinita), já que a tensão decresce continuamente com o número de ciclos de aplicação de carga. Para esses materiais, a fadiga é caracterizada não pelo limite de resistência em fadiga ( $T_{Rf}$ ), mas, pela resistência à fadiga ( $T_f$ ), que é a tensão na qual ocorre ruptura para um número arbitrário de ciclos de aplicação de carga (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008). A Figura 8 mostra a curva tensão x número de ciclos para materiais ferrosos e não-ferrosos.

Figura 8 - Curva S-N, resposta típica do ensaio de fadiga para materiais ferrosos e não-ferrosos



Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS (2008 Apud ASHBY, 1988)

Para criação da Curva de Wöhler, ensaios de fadiga são realizados em corpos de prova com diferentes tensões aplicadas e totalmente reversas. Essa curva fornece dados de fadiga para uma determinada geometria, condição de carregamento, ambiente de ensaio e parâmetros de fabricação (GOMES, 2011).

### 3.3.1 Métodos de ensaio de fadiga

A curva de Wöhler é de fundamental importância na caracterização de um elemento em relação à fadiga, tratando-se da abordagem tensão-número de ciclos. Algumas variáveis como limite de resistência à fadiga, vida (número de ciclos até a falha) e sobrevida (número de ciclos que o componente suporta a determinada tensão sem ocasionar falha) são características essenciais que devem ser consideradas na execução de projetos (GOMES, 2011).

Alguns métodos podem ser escolhidos conforme o objetivo do ensaio, como:

#### 3.3.1.1 Método de estimativa de curva

Utilizado para estimar toda a curva tensão-número de ciclos (GOMES, 2011). Realiza-se os ensaios de fadiga em diferentes níveis de tensão, acrescentando níveis de tensão parecidos a cada novo ensaio (ISO 12107:2012).

#### 3.3.1.2 Método de tensão constante

Baseia-se na determinação da vida em fadiga em um nível de tensão definido para aplicação do componente. Este método é mais eficiente para os níveis de tensões maiores que a tensão de escoamento do material (GOMES, 2011). Os dados obtidos são plotados em um gráfico para verificação da distribuição e cálculo da média e desvio-padrão.

#### 3.3.1.3 Método da sobrevivência

Usado para determinar a média e o desvio-padrão do limite de resistência à fadiga para uma vida prescrita. Corpos de prova são ensaiados em faixas estreitas de tensão, entre dois desvio-padrão acima e abaixo do limite de resistência à fadiga estimado empiricamente, determinando seu limite médio de resistência à fadiga e desvio-padrão (GOMES, 2011).

#### 3.3.1.4 Método *Staircase*

Utilizado na determinação da média e desvio-padrão da resistência à fadiga em uma tensão definida, assumindo que não haverá falhas posteriores a esta. A tensão aplicada para cada corpo de prova é baseado no resultado do teste anterior. Se o corpo de prova anterior não falhou para o número de ciclos pré-determinado, o próximo teste é realizado com um nível de tensão maior. Porém, se este corpo de prova falhar antes de atingir a vida prescrita, o nível de tensão é reduzido no próximo passo (GOMES, 2011).

#### 3.3.2 Ensaio de fadiga

Ensaio de fadiga consiste na aplicação de ciclos de tensão em corpo-de-prova apropriado e padronizado segundo o tipo de ensaio a ser realizado (GARCIA; SPIM, SANTOS, 2008). Os ensaios de fadiga são realizados por:

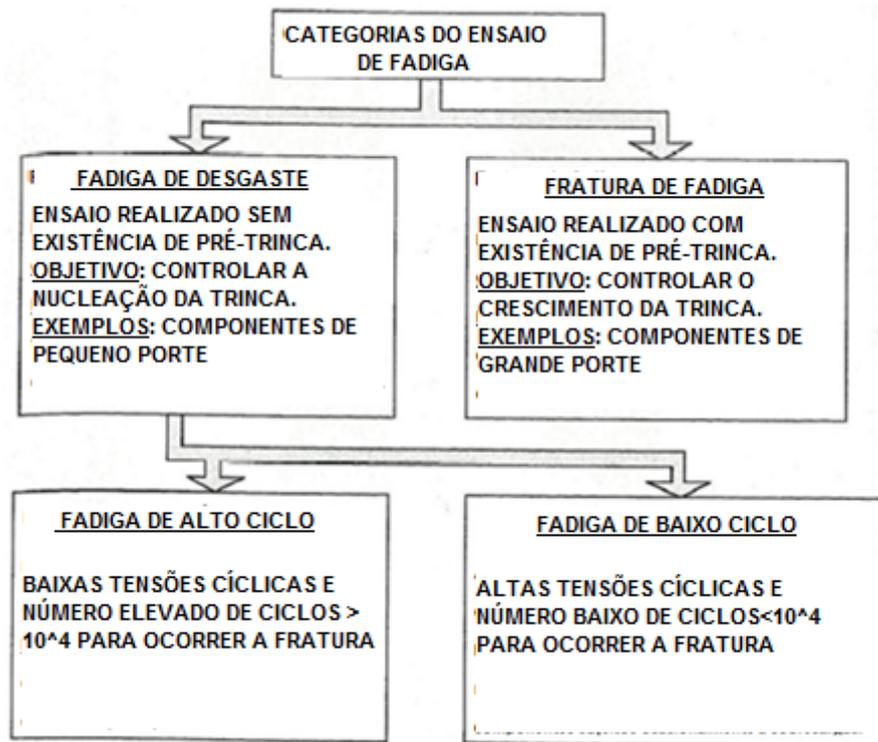
- Torção;
- Tração-compressão;
- Flexão;
- Flexão rotativa.

O ensaio de fadiga fornece dados quantitativos de materiais ou componentes ao suportar, por longos períodos, cargas repetitivas e/ou cíclicas, sem se romper (GARCIA; SPIM, SANTOS, 2008).

August Wöhler fez os primeiros estudos sobre o comportamento de materiais metálicos a esforços alternados e repetitivos na década de 1850. Informações importantes foram obtidas desses estudos, como a apresentação dos resultados do ensaio num gráfico tensão-número de ciclos até a ocorrência da fratura (GARCIA; SPIM, SANTOS, 2008).

Há duas categorias de ensaio de fadiga que correspondem individualmente ao estudo da nucleação de trincas e ao estudo da propagação de trincas (GARCIA; SPIM, SANTOS, 2008). O esquema da Figura 9 a seguir, mostra as categorias do ensaio de fadiga.

Figura 9 - Categorias do ensaio de fadiga

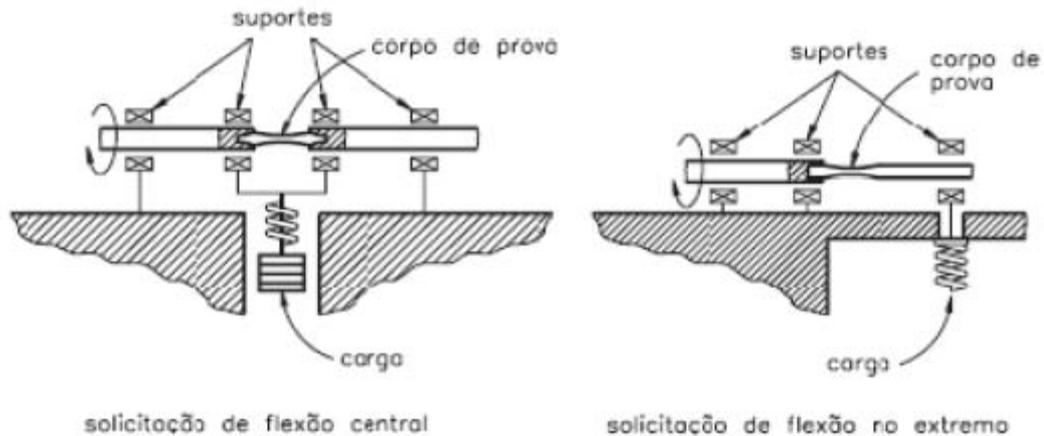


Fonte: Adaptado de GARCIA et al., (2008).

### 3.3.2.1 Ensaio de Flexão rotativa

O ensaio mais freqüentemente utilizado, realizado em corpos de prova extraídos de barras ou perfis metálicos, é o de flexão rotativa, que consiste em submeter um corpo de prova a solicitações de flexão, enquanto o mesmo é girado em torno de um eixo, por um sistema motriz com conta-giros, numa rotação determinada e constante. O ensaio é finalizado com a ruptura do corpo de prova (ENGBRASIL, 2016). O esquema da Figura 10 mostra o ensaio de flexão rotativa, identificando os suportes do equipamento, o corpo de prova encaixado aos suportes, a carga teste do ensaio e rotação do eixo.

Figura 10 - Solicitação de flexão para o ensaio de flexão rotativa



Fonte: Adaptado de ENGBRASIL (2016).

### 3.4 PROCESSOS DE FUNDIÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

As ligas de alumínio fundidas não possuem qualquer tipo de conformação mecânica em seu processamento, o que as diferenciam das ligas conformadas, ou seja, são obtidas diretamente do líquido por meio de processos de fundição (MOREIRA; FUOCO, 2016). Devido à baixa temperatura de fusão das ligas de alumínio, há uma grande flexibilidade quanto aos tipos de moldes utilizados (moldes de areia, moldes metálicos, moldes de gesso, moldes de materiais cerâmicos, etc.) já que as solicitações térmicas são reduzidas. Os moldes podem ser permanentes (moldes metálicos), para grandes produções (mínimo de 10.000 peças) ou moldes para séries menores (molde de areia, gesso, cerâmico) (MOREIRA; FUOCO, 2016).

Segundo Moreira, Fuoco (2016) é importante também, além da moldagem, diferenciar os processos de fundição pela forma de vazamento do metal, podendo ser:

- Sob pressão;
- Sob gravidade;
- Contra a gravidade com baixa pressão.

O vazamento por gravidade, mas, principalmente o sob pressão impõe turbulência ao fluxo de metal, gerando e deixando inclusões de óxidos. Esses óxidos são à base de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), possuem elevada temperatura de fusão e são levemente mais densos que o alumínio líquido, deixando assim defeitos no produto fundido (MOREIRA; FUOCO, 2016).

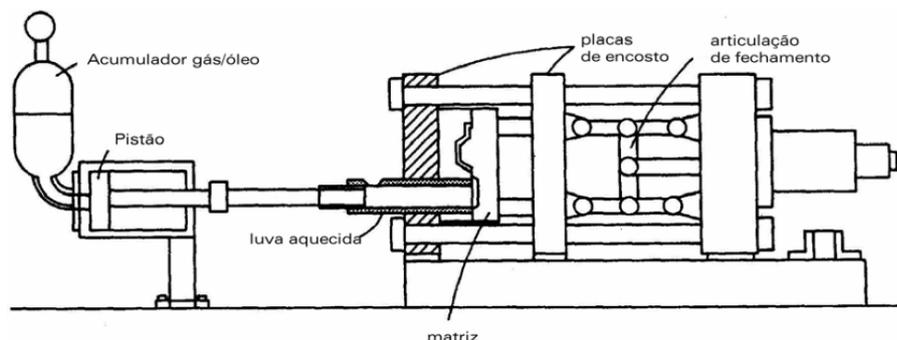
### 3.4.1 Processo de fundição sob pressão

É o processo mais utilizado na fundição de peças em alumínio, permite produção de peças complexas e de paredes finas, devido à alta velocidade de preenchimento. O sistema de vazamento pode ser manual ou automatizado, com pressão de injeção da ordem de 100 a 200 atmosferas ( $103\text{kgf/cm}^2$  a  $206\text{kgf/cm}^2$ ) (MOREIRA; FUOCO, 2016).

Devido às inclusões de óxidos, eventuais vazios de rechupes ou bolsas de ar, as peças produzidas por este processo não podem ser tratadas termicamente. Sua utilização em componentes de alta resistência mecânica não é recomendada. As ligas mais utilizadas sob pressão são: 380.0, A380.0, 413.0 e A413.0.

As máquinas de injeção mais comuns são do tipo câmara fria operando ao lado de um forno de espera, aquecido por meio de resistências elétrica, como mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Esquema de uma máquina de injeção sob pressão do tipo câmara fria



Fonte: MOREIRA, FUOCO (2016).

### 3.4.2 Processo de fundição em molde permanente sob gravidade

Processo muito utilizado na produção de peças seriadas, permite o uso de moldes metálicos ou em areia. As ligas mais usadas sob gravidade são: 319.0, 355.0, 356.0, A356.0 (MOREIRA; FUOCO, 2016).

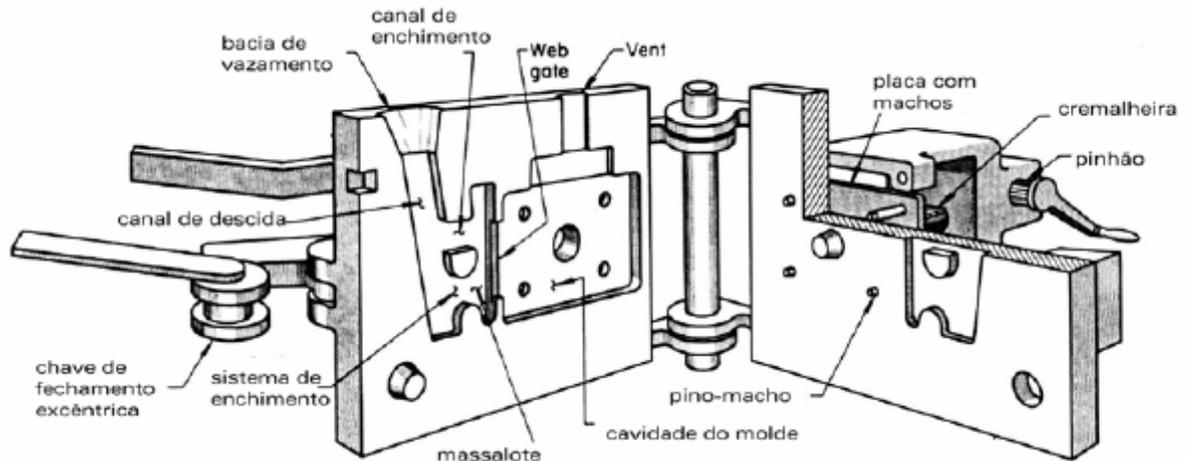
A turbulência no canal de descida e falta de pressão para garantir a alimentação, particularmente em ligas de solidificação pastosa, são problemas do processo de vazamento sob gravidade. Para melhorar as condições de alimentação, propriedades mecânicas (limite de escoamento e resistência), assim como tendência a formação de trincas a quente, pode ser feito um refino de grão, que consiste na diminuição do tamanho de grão, com o aumento do número de núcleos no líquido ou com o aumento da velocidade de resfriamento. O refino de grão é realizado com a adição de pós à base de Al-Ti ou Al-Ti-B na liga líquida. A adição destes refinadores provoca a formação de partículas sólidas dispersas de  $Al_3Ti$  que atuam como núcleos para os primeiros grãos decorrentes da solidificação (MOREIRA; FUOCO, 2016).

Para Moreira, Fuoco (2016), outro problema em componentes fundidos em ligas de alumínio do sistema Al-Si, é que a microestrutura bruta de fundição destas ligas apresenta partículas de Si com morfologia acicular, diminuindo a ductilidade. Para isso, é feito um processo de modificação, que consiste em um tratamento do banho de alumínio silício pela adição (entre 0,005 e 0,02% em peso) de elementos modificadores, refinando a morfologia, aumentando a ductilidade das ligas Al-Si fundidas. Os elementos modificadores mais empregados são: o sódio (Na), o estrôncio (Sr) e o antimônio (Sb). Medidas podem ser empregadas para minimizar a tendência á formação de porosidades:

- No processo de modificação, não empregar sódio (Na) ou estrôncio (Sr) em ligas hipoeutéticas, o antimônio (Sb) é o mais recomendado;
- Realizar um refino de grão eficiente;
- Empregar ligas com pequeno intervalo de solidificação;
- Reduzir ao máximo o teor de hidrogênio dissolvido na liga.

Os processos de fundição em moldes permanentes sob gravidade apresentam custo inferior ao processo de injeção, além de ser mais versátil (MOREIRA; FUOCO, 2016). A Figura 12 mostra um molde metálico com fechamento manual acionada por cremalheira.

Figura 12 - Molde metálico

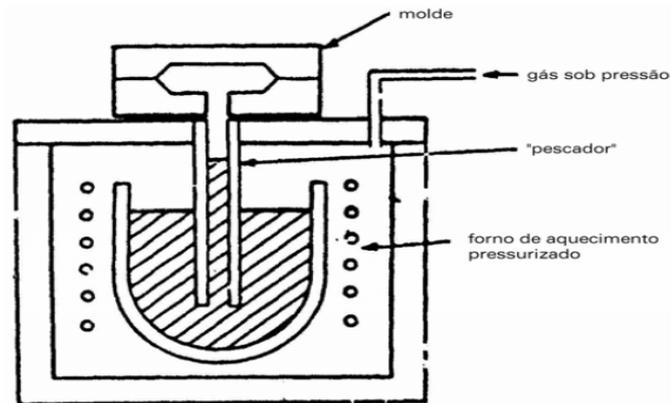


Fonte: MOREIRA, FUOCO (2016).

### 3.4.3 Processo de fundição em baixa pressão

Este processo possui vazamento por baixo, contra a gravidade, por meio de um tubo de alimentação (pescador), em moldes metálicos. Foi desenvolvido especialmente para fabricação de rodas automotivas. Com o passar dos anos, começou a ser utilizado em mais alguns componentes automotivos (braços e bandejas de suspensão) ou aeroespaciais. As ligas mais utilizadas em baixa pressão contra a gravidade são: 356.0 e variantes das ligas 359.0, 413.0 e A413.0. As pressões ( $0,5\text{kgf/cm}^2$  a  $1,5\text{kgf/cm}^2$ ) são aplicadas por meio de ar comprimido, com baixa umidade (MOREIRA; FUOCO, 2016). A Figura 13 mostra uma máquina de baixa pressão.

Figura 13 - Esquema de uma máquina de baixa pressão



Fonte: MOREIRA, FUOCO (2016).

#### 3.4.4 Efeito da vibração na solidificação e nas propriedades do metal no processo de fundição

Os efeitos da vibração na solidificação de metais melhoram o refino de grão, reduz a porosidade e conseqüentemente aumenta a resistência mecânica (KIRCH et al., 2016). As dendritas que se formam quebram-se devido à vibração durante os primeiros estágios da solidificação resultando em um refino de grão e aumento da densidade (TAGHAVI et al., 2009 apud KIRCH et al., 2016). Porém, há um limite de vibração para se obter resultados satisfatórios, que se ultrapassado, o grau de fragmentação das dendritas diminui e seu formato passa de uma estrutura de fibras para uma estrutura grosseira (ABU-DHEIR, 2005 apud KIRCH et al., 2016).

### 3.5 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio é o metal não ferroso mais amplamente utilizado depois do aço em termos de consumo mundial. O alumínio é produzido nas formas “puro” e em liga (NORTON, 2013).

O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma densidade relativamente baixa ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) em relação ao aço ( $7,9 \text{ g/cm}^3$ ), condutividades elétricas e térmicas elevadas, resistentes à corrosão em ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente (CALLISTER, 2002). As ligas de alumínio possuem maiores resistências em relação ao alumínio puro. Os elementos de liga principais

são o cobre, silício, magnésio, manganês e zinco, em quantidades variáveis até próximo de 5% (NORTON, 2013).

As ligas de alumínio são aplicadas em peças estruturais de aeronaves, latas de bebidas, carcaças de ônibus e peças automotivas (blocos do motor, pistões e tubos de distribuição) (CALLISTER, 2002).

As ligas não tratáveis termicamente constituem fase única, e o aumento na resistência é obtido através do endurecimento por solução sólida. No processo de formação de outras ligas, o tratamento térmico é possível através do endurecimento por precipitação (CALLISTER, 2002).

O alumínio pode ser fundido, usinado, soldado, conformado a quente ou a frio e extrudado. Ligas de alumínio são especificamente desenvolvidas para fundição em areia, matriz, extrudadas e para peças forjadas (NORTON, 2013). “As ligas de alumínio fundido têm composição química diferente daquelas para conformação. Algumas delas podem ser endurecidas, porém suas resistências e ductilidades são menores do que as das ligas para conformação” (NORTON, 2013).

Segundo ASM International (1990), um sistema de designação numérico de quatro dígitos incorporando um ponto decimal, como mostrado no Quadro 1, é utilizado para identificar alumínio e ligas de alumínio. O dígito a direita do ponto decimal indica o produto na forma de: (0) fundidos vazados; (1) lingotes convencionais; (2) lingotes com faixas de composições mais restritas que aquelas dos lingotes convencionais.

Quadro 1 – Sistema de designação de alumínios fundidos

Alumínio $\geq$ 99,00%	1xx. x
Ligas Al agrupadas pelo principal elemento(s) de liga: Cobre	2xx. x
Silício, com cobre adicionado e / ou magnésio	3xx. x
Silício	4xx. x
Magnésio	5xx. x
Zinco	7xx. x
Estanho	8xx. x
Outros elementos	9xx. x
Série não utilizada	6xx. x

Fonte: Adaptado de ASM INTERNATIONAL (1990).

Para as ligas 2xx. x a 9xx. x, o grupo da liga é determinado pelo elemento de liga presente em maior porcentagem média, exceto nos casos em que a composição a ser registrada se qualifica como uma modificação de uma liga anteriormente registrada (ASM INTERNATIONAL, 1990). A letra maiúscula antes da identificação numérica indica que as ligas apresentam modificações na composição nominal (MOREIRA; FUOCO, 2016).

As designações de ligas de alumínio mais adotadas são da *ALUMINUM ASSOCIATION* (AA) com suas respectivas composições químicas e processo de fundição, como mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Composição nominal e processo de fundição de algumas ligas de alumínio fundidas

Designação AA	Composição química [%]					Processo de fundição <sup>1</sup>
	Cu	Mg	Mn	Si	Outros	
201.0	4,6	0,35	0,35	-	0,7 Ag; 0,25 Ti	S
206.0	4,6	0,25	0,35	0,10	0,22 Ti; 0,15 Fe	S; P
A206.0	4,6	0,25	0,35	0,05	0,22 Ti; 0,10 Fe	S; P
208.0	4,0	-	-	3,0	-	S
242.0	4,0	1,5	-	-	2,0 Ni	S; P
295.0	4,5	-	-	0,8	-	S
296.0	4,5	-	-	2,5	-	P
308.0	4,5	-	-	5,5	-	S; P
319.0	3,5	-	-	6,0	-	S; P
336.0	1,0	1,0	-	12,0	2,5 Ni	P
354.0	1,8	0,50	-	9,0	-	P
355.0	1,2	0,50	0,50	5,0	0,6 Fe; 0,35 Zn	S; P
C355.0	1,2	0,50	0,10	5,0	0,20 Fe; 0,10 Zn	S; P
356.0	0,25 <sup>2</sup>	0,32	0,35	7,0	0,6 Fe; 0,35 Zn	S; P
A356.0	0,20	0,35	0,10	7,0	0,20 Fe; 0,10 Zn	S; P
357.0	-	0,50	-	7,0	-	S; P
A357.0	-	0,60	-	7,0	0,15 Ti ; 0,005 Be	S; P
359.0	-	0,60	-	9,0	-	D
360.0	-	0,50	-	9,5	2,0 Fe	D
A360.0	-	0,50	-	9,5	1,3 Fe	D
380.0	3,5	-	-	8,5	2,0 Fe	D
A380.0	3,5	-	-	8,5	1,3 Fe	D

1- S = fundição em areia; P = fundição em molde permanente (coquilha por gravidade ou baixa pressão); D = fundição por alta pressão

2- teor máximo permitido pela Aluminum Association - AA

### 3.5.1 Ligas Al – Si (série 300)

Essa série de ligas de alumínio possui as melhores características de fundição, aproximadamente 90% das peças fundidas em alumínio pertencem à série 300. Apresentam elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, porém, são de difícil usinagem, fator que pode ser melhorado com adições de Cu, conseqüentemente elevando a resistência mecânica, mas reduzindo a ductilidade. Ligas tornam-se endurecíveis com adições de magnésio (Mg) realizando tratamentos térmicos, elevando sua resistência mecânica (MOREIRA; FUOCO, 2016).

Menores teores de Si (5 a 7% Si) são normalmente empregados em ligas para fundição em moldes de areia, enquanto que ligas de maior teor (9 a 13% Si) são normalmente utilizadas em moldes permanentes ou sob pressão (MOREIRA; FUOCO, 2016).

Coletores de admissão, cabeçotes e blocos de motor, pistões e rodas automotivas, peças estruturais para a indústria aeroespacial, bombas, carcaças e componentes de suspensão são algumas das diversas aplicações (MOREIRA; FUOCO, 2016).

### 3.5.2 Liga de alumínio A380.0

A Liga A380.0 (ANSI / AA A380.0) é a liga de alumínio fundida mais amplamente utilizada industrialmente, oferecendo a melhor combinação de propriedades dos materiais e facilidade de produção na maioria das aplicações de produtos. Alguns dos usos desta liga incluem equipamentos eletrônicos e de comunicação, componentes automotivos, suportes de motor, caixas de transmissão e engrenagens, eletrodomésticos, caixas de cortador de grama, componentes de mobiliário, ferramentas manuais e elétricas (NADCA, 2009).

A liga de alumínio A380.0 possui elevada resistência mecânica em locais com temperaturas ambiente e elevada, muito boa fluidez, boa estanqueidade sob pressão, usinabilidade e resistência à corrosão (ABAL, 2016).

A composição química da liga de alumínio A380.0 está expressa em faixas de porcentagem em massa, conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Composição Química da Liga A380.0

Elemento	Limite de composição (%)
Cu (Cobre)	3.0 – 4.0
Mg (Magnésio)	0.0 – 0.10
Mn (Manganês)	0.0 – 0.50
Si (Silício)	7.5 – 9.5
Fe (Ferro)	0.0 – 1.3
Ni (Níquel)	0.0 – 0.50
Zn (Zinco)	0.0 – 3.0
Sn (Estanho)	0.0 – 0.35
Outros (Total)	0.0 – 0.50
Al (Alumínio)	Balanço

Fonte: Adaptado de ASM INTERNATIONAL (1990).

As propriedades mecânicas da liga de alumínio A380.0 estão descritas no Quadro 4.

Quadro 4 - Propriedades da Liga A380.0 sem vibração e com vibração de 2 bar

Propriedades	1 bar	2 bar
Resistência à tração (MPa)	207	214
Alongamento em 50mm ou 2 pol. (%)	4,60	3,60
Dureza (HV)	82,90	83,77

Fonte: (KIRCH et al., 2016).

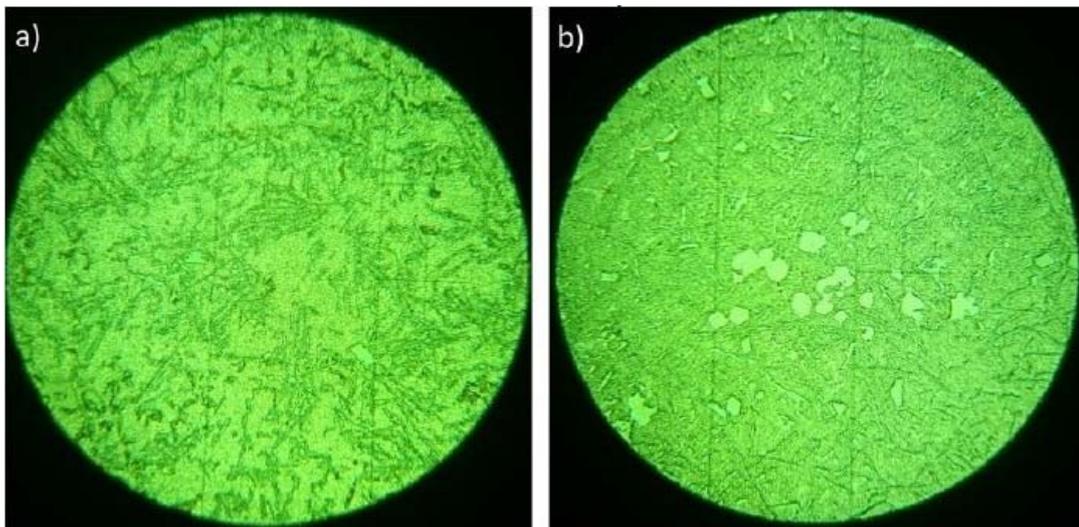
### 3.5.3 Propriedades mecânicas e microestrutura da liga A380.0

O ensaio de tração mostrou que houve um aumento de 3,5% na resistência a tração do corpo de prova submetido à vibração com pressão de 2 bar com relação ao sem vibração (1 bar). Seu valor passou de 207 MPa para 214 MPa (KIRCH et al., 2016).

Conforme Kirch et al., (2016), através da análise microestrutural realizada em uma amostra sem vibração e uma amostra vibrada (2 bar), pode-se observar que houve um aumento significativo da quantidade de intermetálicos presentes na microestrutura da amostra com vibração. A dureza medida na amostra sem vibração foi de 82,9HV, enquanto na amostra com vibração foi de 83,77HV. Porém, em

regiões de aglomeração dos intermetálicos da amostra com vibração, houve um aumento significativo da dureza, passando para 104HV, resultando em um aumento de 24%. A Figura 14 mostra as diferenças microestruturais encontradas em ambas as amostras, podendo-se notar a presença de intermetálicos na matriz mais refinada da amostra submetida à vibração.

Figura 14 - Microestruturas referentes às amostras obtidas a) sem vibração e b) com vibração de 2 bar de pressão



Fonte: (KIRCH et al., 2016).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

- A composição química da liga A380.0 utilizada para a fabricação dos corpos de prova está apresentado no Quadro 5.

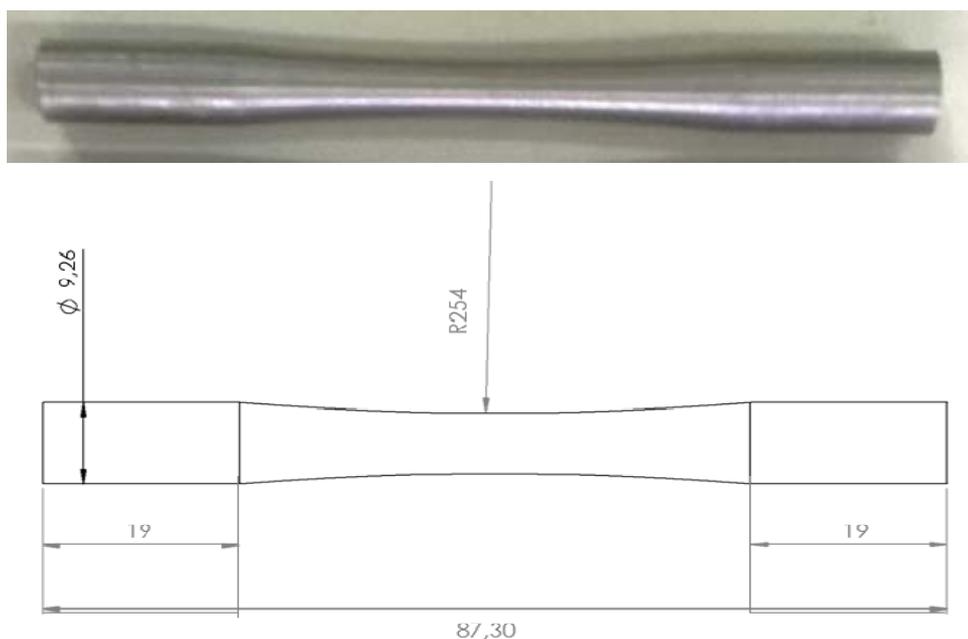
Quadro 5 - Composição química da amostra após fundição da liga A380.0 conforme (AA)

Certificado de análise	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Pb	Cr	Ni	Ti	Sn	Sr	Ca	Al
Empresa 1	8,6	1,1	3,66	0,247	0,094	1,932	0,083	0,052	0	0,027	0,048	0	0,0011	83,08
Empresa 2	9,59	1,15	2,32	0,331	0,0867	1,16	0,0499	0,0456	0,0016	0,0262	0,0234	0	0,0013	85,1
Limites (AA)	7,5-9,5	1,3	3,0-4,0	0,5	0,1	3	0	0	0,5	0	0,35	0	0	Restante

Fonte: (KIRCH et al., 2016).

- Usinagem em torno mecânico convencional
- Usinagem em torno CNC para se obter a forma padrão final do corpo de prova para o ensaio de flexão rotativa, conforme Figura 15.

Figura 15 - Corpo de prova acabado



Fonte: O Autor.

Para a realização dos ensaios de fadiga em flexão rotativa foi necessário a fabricação dos corpos de prova com base no manual de pré-instalação da máquina para testes de fadiga de vigas rotativas em alta velocidade modelo R.R. Moore.

Os corpos de prova foram fabricados com o raio máximo de curvatura em sua região útil (25,4mm) para que fosse possível a variação de carga em relação aos pesos existentes no laboratório. Com um raio de curvatura menor, qualquer carga aplicada poderia ultrapassar facilmente a tensão de ruptura do material, dificultando a obtenção dos resultados do ensaio.

## 4.2 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados foram: (i) torno mecânico convencional (Romi TORMAX 20), (ii) torno CNC (EMCO PC TURN 55), (iii) máquina para testes de fadiga de vigas rotativas em alta velocidade modelo R.R. Moore (INSTRON). A máquina para testes de fadiga de vigas rotativas está mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Máquina para testes de fadiga de vigas rotativas



Fonte: O Autor.

## 4.3 MÉTODOS

### 4.3.1 Cálculo da tensão alternante

Para obtenção da tensão necessária, o diâmetro mínimo de cada corpo de prova deve ser medido com uma precisão de 0,01mm (ISO 1143, 2010). O cálculo de tensão alternante é dado pela equação a seguir, conforme manual de pré-instalação da máquina de flexão rotativa INSTRON (2008):

$$\sigma_a = \frac{16 \cdot W \cdot 101,6 \cdot 9,81}{\pi \cdot d^3} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_a$  = (tensão alternante em flexão-rotativa) em Mpa;

W = (peso a ser adicionado) em kg;

d = (diâmetro mínimo do corpo de prova) em mm;

101,6 é a distância entre o suporte na extremidade e o ponto de carga.

Deve-se levar em consideração o peso efetivo das caixas de rolamento e suporte para carregamento de pratos de peso, que totalizam 5kg, devendo ser adicionado posteriormente para cálculo da tensão alternante.

### 4.3.2 Frequência dos ciclos de tensão

Á combinação de alta tensão aplicada e alta rotação no ensaio (normalmente entre 15 e 200Hz) podem gerar aquecimento excessivo do corpo de prova para alguns materiais, influenciando a vida em fadiga resultante (ISO 1143, 2010).

A rotação usual de ensaio é de 62,5Hz, ou seja, 3750 rotações por minuto (rpm) (ASM INTERNATIONAL, 2008), porém, como o sistema de controle do motor é

de 60Hz, o ensaio será realizado a 3600 rpm, com variação da carga gerando diferentes níveis de tensão.

#### 4.3.3 Apresentação dos resultados

Segundo a norma ISO 12107:2012, para a apresentação de resultados, um mínimo de 7 corpos de prova são recomendados para fins de trabalho exploratório e um mínimo de 28 corpos de prova para fins de projeto para desenvolvimento de curvas tensão-número de ciclos em uma determinada tensão.

Para gerar a curva tensão-número de ciclos (Curva de Wöhler), foi utilizado o método de estimativa de curva, acrescentando-se níveis de tensão aproximadamente iguais a cada novo corpo de prova ensaiado em flexão-rotativa. Com a dispersão dos pontos obtidos, foi possível traçar a linha de tendência.

## 5 RESULTADOS

As amostras da liga A380.0 utilizadas no ensaio foram vibradas através de pressões aplicadas ao molde metálico no processo de fundição. As pressões utilizadas foram: 0,5 bar, 1,5 bar e 3 bar. O ensaio foi finalizado com a falha do corpo de prova, ou seja, até sua ruptura, conforme Figura 17.

Figura 17 - Falha do corpo de prova



Fonte: O Autor.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA A380.0 PELA CURVA DE WÖHLER

Com os resultados do ensaio de fadiga nos corpos de prova, foi possível plotar as curvas tensão x número de ciclos para as 3 pressões de vibração aplicadas no molde (0,5 bar, 1,5 bar e 3 bar), traçando uma linha de tendência referente aos pontos distribuídos nos gráficos. O Quadro 6 mostra as tensões alternantes aplicadas e o número de ciclos obtidos para os corpos de prova ensaiados.

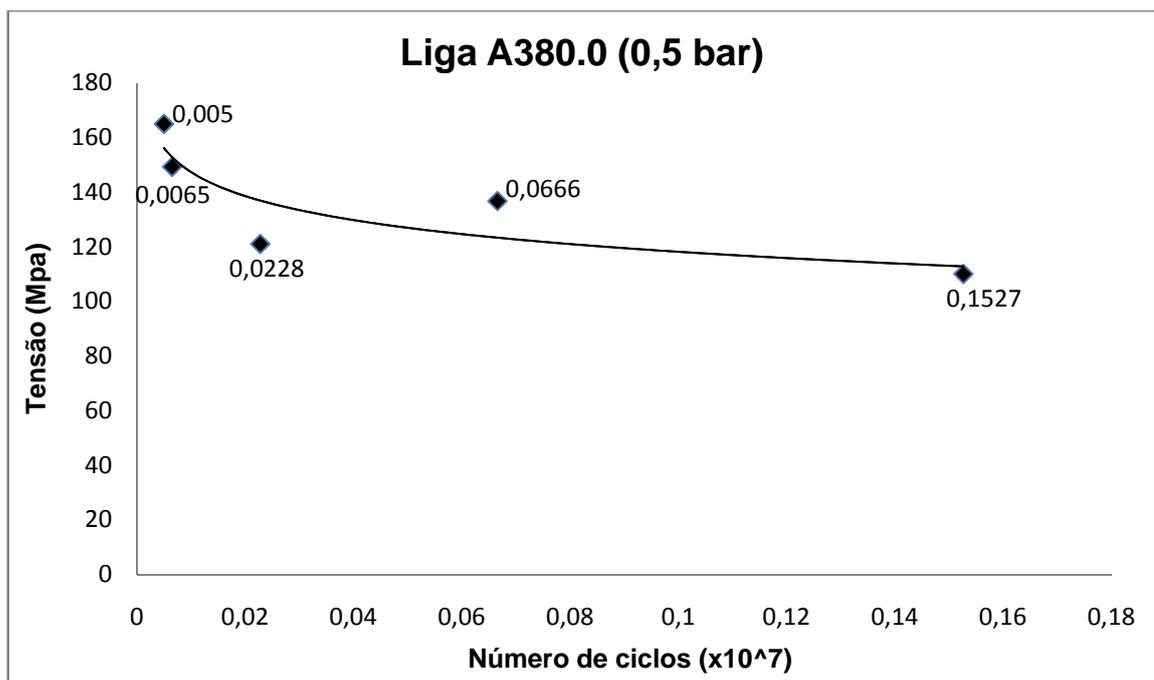
Quadro 6 - Tensões alternantes e número de ciclos

Pressão	C.Prova	$\sigma_a$ (Mpa)	N(Ciclos)	N( $10^7$ )
0,5 BAR	12	110	1527061	0,1527
	11	121	227956	0,0228
	15	136,7	665754	0,0666
	9	149,25	65460	0,0065
	13	157,1	141054	0,0141
	14	164,96	49700	0,005
1,5 BAR	18	121	236637	0,0237
	19	136,7	386234	0,0386
	17	149,25	53037	0,0053
	22	157,1	53451	0,0053
3 BAR	23	164,96	69643	0,007
	1	110	181707	0,0182
	2	121	1695911	0,1696
	3	136,7	309339	0,031
	4	149,25	38670	0,0039
	5	157,1	19324	0,0019
	6	164,96	3872	0,00039

Fonte: O Autor.

A Figura 18 mostra os pontos resultantes do ensaio de flexão rotativa e a linha de tendência para pressão de vibração equivalente a 1,5 bar.

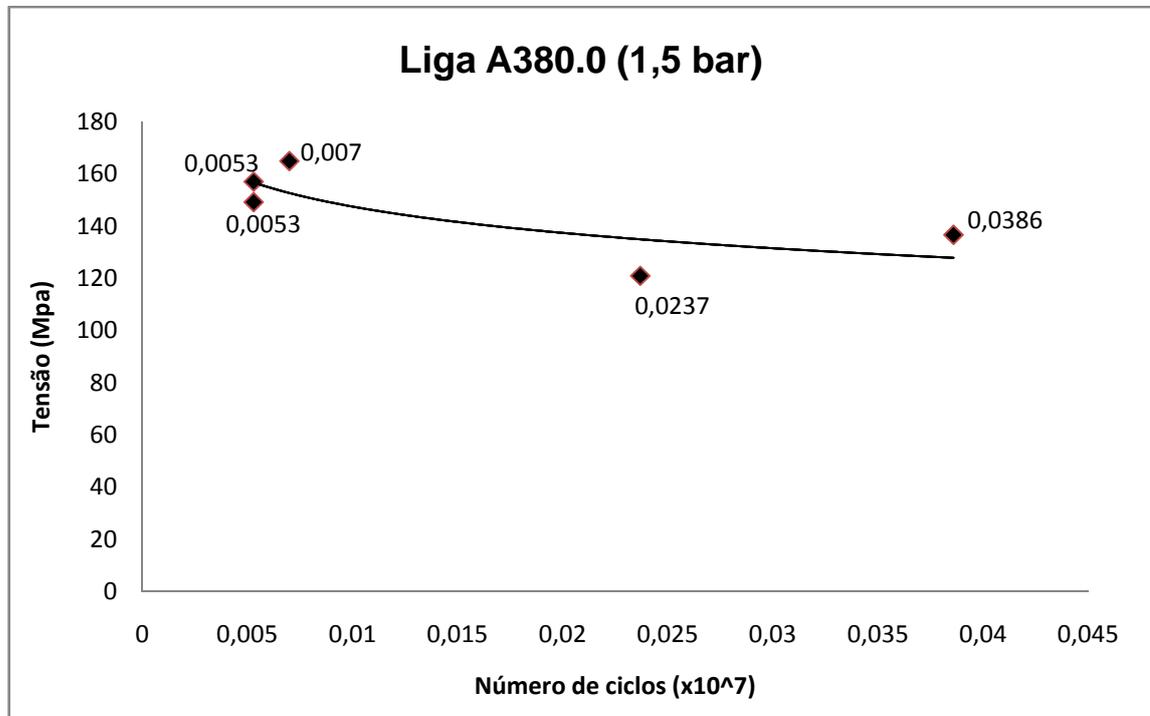
Figura 18 - Curva de Wöhler para pressão de vibração a 0,5 bar



Fonte: O Autor.

A Figura 19 mostra os pontos resultantes do ensaio de flexão rotativa e a linha de tendência para pressão de vibração equivalente a 1,5 bar.

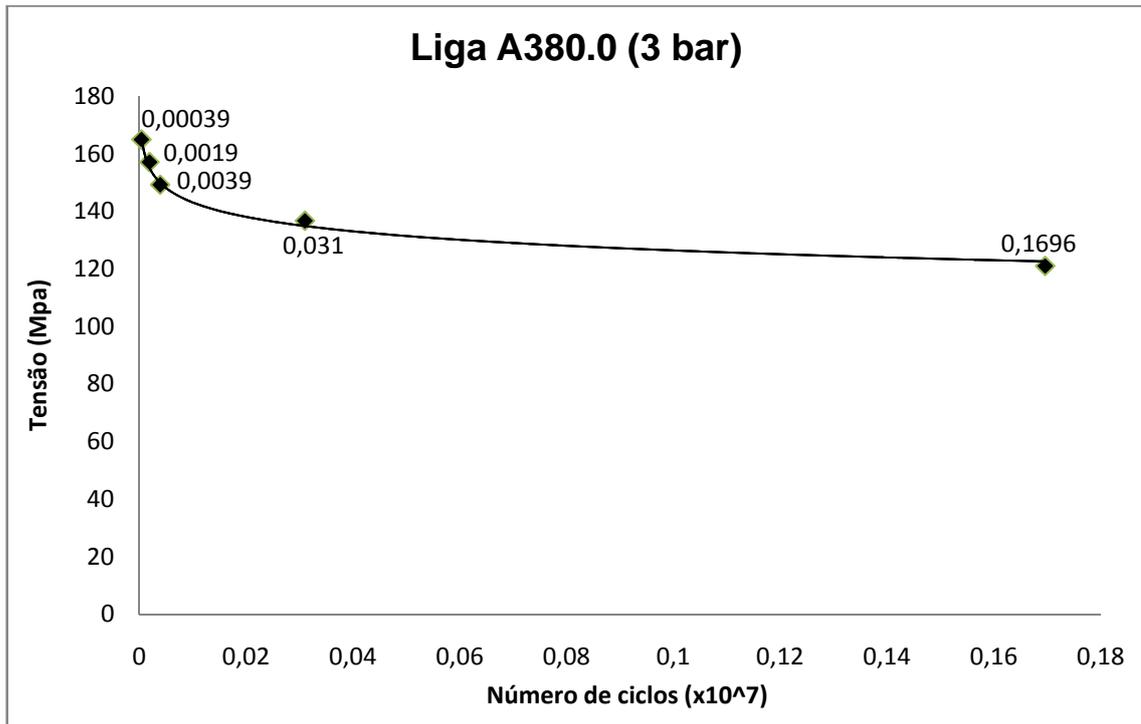
Figura 19 - Curva de Wöhler para pressão de vibração a 1,5 bar



Fonte: O Autor.

A Figura 20 mostra os pontos resultantes do ensaio de flexão rotativa e a linha de tendência para pressão de vibração equivalente a 3 bar.

Figura 20 - Curva de Wöhler para pressão de vibração a 3 bar



Fonte: O Autor.

As propriedades de fadiga da liga de alumínio A380.0 para faixa de variação de tensão aplicada (110MPa à 164,96MPa) experimentalmente aos corpos de prova, mostraram certa dispersão nos resultados em relação ao número de ciclos obtidos a uma determinada tensão, como explicitado na literatura, porém, não houve grande variação dos resultados se comparado os resultados entre as 3 pressões de vibração utilizadas no processo de fundição da liga A380.0.

Foi possível observar que para a tensão aplicada para as amostras vibradas a 0,5 bar e 1,5 bar, próxima a tensão de resistência a fadiga (138MPa) da liga A380.0, que o número de ciclos teve um aumento significativo em relação a tensão aplicada no corpo de prova anterior (121MPa). Isso pode ser explicado devido a tensão de resistência a fadiga onde o material pode suportar estes carregamentos cíclicos com um mínimo de redução na resistência nominal por um maior número de ciclos. Outra causa a ser considerada é a existência de porosidades internas e pré-trincas na superfície, que se propagaram levando a ruptura dos corpos de prova ensaiados com carga de 121MPa, que tiveram sua vida em fadiga menor que os corpos de prova ensaiados com 136,7MPa. A Figura 21

mostra a análise da fratura do corpo de prova com 121MPa de tensão alternante aplicada durante o ensaio, evidenciando porosidade e pré-trincas no corpo de prova.

Figura 21 - Análise da fratura



Fonte: O Autor.



## 6 CONCLUSÃO

Com a realização do ensaio de fadiga em flexão-rotativa dos corpos de prova, para fins de trabalho exploratório, foi possível fazer uma previsão de curva para estimar vida em fadiga do material, seguindo as normas ISO 1143:2010 que especifica realização de ensaio por flexão-rotativa e ISO 12107:2012 que determina a apresentação de resultados conforme objetivo do ensaio.

Como proposto inicialmente neste trabalho, os objetivos gerais e específicos foram alcançados. Os corpos de prova foram usinados e ensaiados, sendo possível estimar a vida em fadiga das amostras fundidas com diferentes condições de vibração, obtendo-se curva tensão-número de ciclos, concluindo que a porosidade e defeitos na superfície durante o processo de fabricação e usinagem influenciam diretamente na vida do material.

Para trabalhos futuros, a sugestão seria analisar a microestrutura do material para verificar a possibilidade de inclusões, falhas, porosidade que possam ter influenciado na resistência à fadiga.



## REFERÊNCIAS

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Ligas de Alumínio Utilizadas em Fundição**. Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/ligas-de-aluminio-utilizadas-em-fundicao/>>. Acesso em: 26 out. 2016.

ASHBY, M.F. & Jones, D.R.H. **Engineering Materials 1 - An Introduction to their Properties and Applications**. Pergamon Press (1988).

ASM INTERNATIONAL. **FATIGUE. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys**, 2008 Disponível em <[http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05224G\\_Chapter14.pdf](http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05224G_Chapter14.pdf)>. Acesso em: 30 de out. 2016.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5.ed. São Paulo: LTC, 2002.

CDMUNICAS. **ContruzionediMacchine. Fatica** 2p. disponível em <<http://www.cdmunicas.it/notes/pem/2016/19%20-%20fatica%20parte%202.pdf>>. Acesso em: 20 de abr. 2017.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

ENGBRASIL. **Ensaio Mecânicos de Materiais: Ensaio de Fadiga**. Disponível em: <<http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula11.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2016.

FREDEL, Márcio C. **Propriedades mecânicas: ensaios fundamentais – vol 1**. Florianópolis, 2015.

GARCIA, Amauri; SPIN, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

GOMES, Daniel Januário Cordeiro. **Determinação de resistência à fadiga em aços ABNT 4140 em vidas super longas (giga ciclos)**. 2011. 126f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Pontifícia Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

HANDBOOK. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. vol 2. ed: Ohio: ASM International, 1990.

INSTRON. **Manual de pré-instalação**. Grove City: Instron, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: **ISO 12107:2012: Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data**. genebra, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: **ISO 1143:2010: Metallic Materials – Rotating bar Bending Fatigue Testing**.Genebra, 2010.

KIRCH, Laura ferrazza; SETTI, Dalmarino; SHIMOSAKA, Amanda yuki. **Caracterização mecânica da liga A380.0 fundida sob diferentes condições de vibração**. Pato branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

MOREIRA, Marcelo F.; FUOCO, Ricardo. **Materiais de construção mecânica: Ligas de alumínio fundidas**. Disponível em: <<http://dalmolim.com.br/>>. Acesso em: 26 out. 2016.

NADCA. North American Die Casting Association. **NADCA Product Specification Standards for Die Castings: Alloy Data Section 3**.2009. Disponível em: <[http://www.tcdcinc.com/media/2009\\_NADCA\\_Alloy\\_Data.pdf](http://www.tcdcinc.com/media/2009_NADCA_Alloy_Data.pdf)>. Acesso em: 26 out. 2016.

NORTON, R.L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PESCI, Pedro Guilherme Silva. **Análise do comportamento em fadiga de rodas ferroviárias fabricadas pelos processos de forjamento e fundição**. 2013. 71 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/120543>>. Acesso em: 24 de outubro 2016.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica – mecânica da fratura e fadiga**. Florianópolis: UFSC, 2012.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

TRONCO, Luiz Fernando. **Desenvolvimento de um procedimento para realização de ensaio de fadiga por flexão-rotativa e obtenção da vida em fadiga da liga AA6063-T6**. 2016 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

## ANEXO A - PROGRAMA PARA USINAGEM CNC DO CORPO DE PROVA

<p>O0017  N5 (CORPO DE PROVA 1);  N10 G00 X50 Z0;  N14 T0202;  N15 G96 S200 F0.05 M03;  N16 G92 S1800;  N17 G00 X15 Z0;  N23 G01 X12.5 Z0;  N24 Z-92.8;  N25 X14;  N26 Z-91.386;  N27 G0 Z-1;  N30 G01 X12;  N31 Z-92.8;  N32 X12.7 Z-91.386;  N33 G0 Z-2;  N35 G1 X11.5 Z-2;  N36 Z-92.8;  N37 X11.9;  N38 Z-91.386;  N39 G0 Z-3;  N40 G01 X11.5;  N42 X11.1 Z-3;  N43 Z-92.8;  N44 X11.5;  N45 Z-91.386;  N46 G0 Z-4;  N47 G01 X11.1;  N49 X10.7 Z-4;  N50 Z-92.8;  N51 X11.1;  N52 Z-91.386;  N53 G0 Z-5;  N55 G01 X10.3 Z-5;  N56 Z-92.8;  N57 X10.7;  N58 Z-91.386;  N59 G0 Z-6;  N61 G01 X10.26 Z-6;  N62 Z-24.5;  N63 G18 G3 X10.252 Z-24.587 R0.9;  N64 G2 X9.9 Z-26.462 R253.1;  N65 G1 Z71.838;  N66 G2 X10.252 Z-73.713 R253.1;  N67 G3 X10.26 Z-73.8 R0.9;  N68 G1 Z-92.8;  N69 X10.4;  N70 Z-91.386;  N71 G0 Z-25.048;  N72 G1 X10.4;  N73 X9.9 Z-26.462;  N74 G2 X9.5 Z-28.806 R253.1;  N75 G1 Z-69.494;  N76 G2 X10.1 Z-72.923 R253.1;  N77 G1 X10.4 Z-71.509;  N78 G0 Z-27.392;  N79 G1 X10.4;  N80 X9.5 Z-28.806;  N81 G2 X9.1 Z-31.461 R253.1;  N82 G1 Z-66.84;</p>	<p>N83 G2 X9.7 Z-70.698 R253.1;  N84 G1 X10.4 Z-69.284;  N85 G0 Z-30.046;  N87 G01 X9.1 Z-31.461;  N88 G2 X8.7 Z-68.213 R253.1;  N89 G1 Z-63.706;  N90 G2 X9.3 Z-68.213 R253.1;  N91 G1 X10.4 Z-66.799;  N92 G0 Z-33.18;  N94 G01 X8.7 Z-34.594;  N95 G2 X8.3 Z-38.625 R253.1;  N96 G1 Z-59.675;  N97 G2 X8.9 Z-65.349 R253.1;  N98 G1 X10.4 Z-63.935;  N99 G0 Z-37.211;  N101 G01 X8.3 Z-38.625;  N102 G2 X8.081 Z-41.707 R253.1;  N103 G1 Z-56.593;  N104 G2 X8.5 Z-61.852 R253.1;  N105 G1 X10.4 Z-60.438;  N106 G0 Z-40.293;  N108 G01 X8.081 Z-41.707;  N109 G2 X8.281 Z-59.445 R253.1;  N110 G1 X10.4 Z-58.031;  N115 G00 Z-6;  N118 G01 X9.86 Z-6;  N119 Z-24.5;  N120 Z-24.513;  N121 X9.858 Z-24.526;  N122 X9.856 Z-24.539;  N123 G2 Z-73.761 R253.6;  N124 G3 X9.86 Z-73.8 R0.4;  N125 G1 Z-92.8;  N126 X10.4 Z-91.386;  N129 G0 Z-6;  N132 G01 X9.26 Z-6;  N133 Z-24.5;  N134 Z-24.513;  N135 X9.458 Z-24.526;  N136 X9.456 Z-24.539;  N137 G2 Z-73.761 R253.6;  N138 G3 X9.46 Z-73.8 R0.4;  N139 G1 Z-92.8;  N140 X10.4 Z-91.386;  N142 G0 Z-6;  N143 G96 S150 F0.01;  N144 G92 S2500;  N146 G01 X10.4 Z-6;  N150 Z-24.5;  N151 Z-24.513;  N152 X9.258 Z-24.526;  N153 X9.256 Z-24.539;  N154 G2 Z-73.761 R253.6;  N155 G3 X9.26 Z-73.8 R0.4;  N156 G1 Z-92.8;  N157 X10.4 Z-91.386;  N160 G0 Z-6;  N161 X18 Z-6;  N162 M05;  N163 M30;</p>
---	--