

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LUCAS GOUVEA SILVA

ANÁLISE DE NUCLEAÇÃO DE TRINCAS NA LIGA DE ALUMÍNIO AA  
2524 – T3 QUANDO SUBMETIDA A FADIGA EM AMBIENTE  
ATMOSFÉRICO E NÉVOA SALINA

SÃO CARLOS

2017



LUCAS GOUVEA SILVA

ANÁLISE DE NUCLEAÇÃO DE TRINCAS NA LIGA DE ALUMÍNIO AA  
2524 – T3 QUANDO SUBMETIDA A FADIGA EM AMBIENTE  
ATMOSFÉRICO E NÉVOA SALINA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. José Benedito Marcomini

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S586a Silva, Lucas Gouvea  
Análise de nucleação de trincas na liga de alumínio AA 2524 - T3 quando submetida a fadiga em ambiente atmosférico e névoa salina / Lucas Gouvea Silva; orientador José Benedito Marcomini. São Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

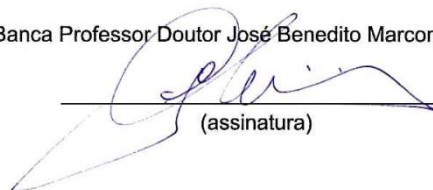
1. Fadiga. 2. Fadiga assistida por corrosão. 3. AA 2524 - T3. 4. Liga de alumínio. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

<b>Candidato:</b> Lucas Gouvea Silva
<b>Título do TCC:</b> ANÁLISE DE NUCLEAÇÃO DE TRINCAS NA LIGA DE ALUMÍNIO AA 2524 – T3 QUANDO SUBMETIDA A FADIGA EM AMBIENTE ATMOSFÉRICO E NÉVOA SALINA
<b>Data de defesa:</b> 13/11/2017

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor José Benedito Marcomini (orientador)	APROVADO
Instituição: EESC - SMM	
Professor Doutor Carlos Alberto Fortulan	Aprovado
Instituição: EESC - SEM	
Pesquisador Carla Isabel dos Santos Maciel	Aprovado
Instituição: EESC - SMM	

Presidente da Banca Professor Doutor José Benedito Marcomini



(assinatura)

## DEDICATÓRIA

Dedico a realização deste trabalho de conclusão de curso aos meus pais, avós e pessoas próximas que sempre me proveram todo o suporte necessário para que eu pudesse dedicar meu tempo aos estudos e me desenvolver como profissional e pessoa.

*A minha família pelo amor, suporte e dedicação.*

## RESUMO

**SILVA, L.G. Análise de nucleação de trincas na liga de alumínio AA 2524 – T3 quando submetida a ensaios de fadiga em ambiente atmosférico e névoa salina. 2017. 57 f.**  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos,  
Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

As ligas de alumínio são em geral conhecidas por possuírem propriedades como baixa densidade, alta elasticidade, alta resistência mecânica e boa resistência à corrosão, o que chamou a atenção de diversos setores da indústria, especialmente a aeronáutica. Atualmente estes materiais estão presentes em aplicações como fuselagem, asas e teto da grande maioria das aeronaves. Entretanto uma das maiores preocupações deste segmento da indústria é a ocorrência de falhas estruturais causadas por problemas de fadiga ou fadiga assistida pelo meio ambiente (corrosão-fadiga), fator que tem impulsionado e demandado a elaboração de estudos nesse âmbito. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é estudar comparativamente a resistência da liga de Alumínio AA 2524-T3 quando submetida a fadiga e a fadiga assistida por corrosão, avaliando a influência do ambiente na vida do material, obtendo as equações (para condição ambiente e para o ar) capazes de estimar sua vida e comparando –baseando na tese de Gamboni (2011)- o efeito do fator de carregamento no desempenho do material. Para a elaboração dos ensaios foram seguidas as normas ASTM E468-11 (2011) e ASTM E739-10 (2010), e então obteve-se um número de ciclos médio para a vida em fadiga dos corpos de teste ensaiados em condição atmosférica (ar) de 1.884.777 ciclos. Já para os ensaios realizados com os corpos de prova submetidos a névoa salina, o número de ciclos médio obtido foi de 359.632 ciclos. Tais resultados comprovam na prática a forte influência do ambiente na vida do material, destacando como principais mecanismos atuantes na redução de desempenho os pites de corrosão, a fragilização por hidrogênio e os efeitos eletroquímicos na corrosão.

Palavras-chave: Fadiga. Fadiga assistida por corrosão. AA2524-T3. Liga de alumínio.

## ABSTRACT

**SILVA, L.G. Analysis of crack nucleation in the aluminum alloy AA 2524 - T3 when subjected to fatigue tests in atmospheric environment and salt spray. 2017. 57 f.**  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Aluminum alloys are generally known due to properties such as low density, high elasticity, high mechanical strength and good corrosion resistance, attracting the attention of several industry sectors, especially aeronautics. Currently, these materials are present in applications such as fuselage, wings and roof of the vast majority of aircrafts. However, one of the major concerns of this industry segment is the occurrence of structural failures caused by fatigue or environmental fatigue (corrosion-fatigue), a factor that has driven and demanded elaboration of studies in this field. The objective of the present work is to compare the strength of AA 2524-T3 aluminium alloy when subjected to fatigue and corrosion assisted fatigue, evaluating the influence of environment on material life, obtaining equations (for ambient conditions and to the air) capable of estimating their life and comparing - based on Gamboni's thesis (2011) - the effect of loading factor on material performance. For tests preparation, the standards ASTM E468-11 (2011) and ASTM E739-10 (2010) were followed, and numbers of cycles referring to fatigue life of each specimen tested in each condition was generated. Just to quantify, in atmospheric conditions (air) the average number of life cycles was 1,884,777. Otherwise, for the tests carried out with the test specimens submitted to saline mist, the average number of cycles obtained was 359.632. These results prove in practice a strong influence of the environment on material life, highlighting that some mechanisms acts in the reduction of mechanical performance of this alloy when exposed to corrosion-fatigue. The main mechanisms mentioned here in this paper are pites of corrosion, embrittlement by hydrogen and electrochemical effects in the corrosion.

Keywords: Fatigue. Environmental fatigue. AA 2524-T3. Aluminium alloy.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquemático sobre o movimento das discordâncias no reticulado cristalino favorecendo a deformação plástica. ....	15
Figura 2: Bandas de deslizamento.....	16
Figura 3: Mecanismos de nucleação de trincas.....	17
Figura 4: Esquemático do defeito do tipo pite. ....	19
Figura 5: Potencial de corrosão em função do elemento de liga. ....	22
Figura 6: Efeito da tensão média na vida em fadiga dos materiais.....	23
Figura 7: Máquina marca MTS servohidráulica Landmark de 100 kN.....	28
Figura 8: Geometria e dimensões do corpo de prova, vista superior.....	31
Figura 9: Direção de laminação dos corpos de prova, vista superior. ....	31
Figura 10: Granulometria das lixas utilizadas na superfície útil do corpo de prova. ....	32
Figura 11: Superfície útil do corpo de prova após processo completo de lixamento, vista laetral. ....	32
Figura 12: Montagem do equipamento para ensaio em névoa salina. ....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química (% em peso) da liga 2524 T3. ....	26
Tabela 2: Resultados dos ensaios de tração da liga 2524-T3.....	27
Tabela 3: Matriz dos ensaios a serem realizados esta apresentada abaixo. ....	27
Tabela 4: Rugosidade dos corpos de prova amostrais. ....	33
Tabela 5: Parâmetros pré-definidos para ensaios de fadiga em ar.....	34
Tabela 6: Características dimensionais dos corpos de prova ensaiados em ar. ..	35
Tabela 7: Parâmetros pré-definidos para ensaios de fadiga em névoa. ....	36
Tabela 8: Características dimensionais dos corpos de prova ensaiados em névoa salina.....	37
Tabela 9: Percentuais de replicabilidade dos ensaios. ....	40
Tabela 10: Valores de tensão calculados para os ensaios em ar. ....	40
Tabela 11: Cargas aplicados nos ensaios em ar. ....	41
Tabela 12: Número de ciclos necessário para fratura de cada corpo de prova ensaiado em ar. ....	42
Tabela 13: Tensões associadas ao ensaio em névoa salina.....	44
Tabela 14: Cargas associadas ao ensaio em névoa salina.....	44
Tabela 15: Número de ciclos necessário para fratura de cada corpo de prova ensaiado em névoa salina. ....	45

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva de Wohler (Tensão de amplitude x Vida ou S-N) para os ensaios em ar. ....	43
Gráfico 2: Curva de Wohler (Tensão de amplitude x Vida ou S-N) para os ensaios em névoa salina. ....	46
Gráfico 3: Gráfico comparativo de amplitude de tensão de ensaios em ar com razões de carga 0,1 e 0,5. ....	49
Gráfico 4: Gráfico comparativo de amplitude de tensão corrigida por SWT de ensaios em ar com razões de carga 0,1 e 0,5.....	50
Gráfico 5: Gráfico comparativo de ensaios em ar e névoa com razões de carga 0,5. ....	52

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1	Fadiga .....	15
2.2	Efeito da Corrosão por Pites na Vida do Material .....	17
2.3	Efeitos Eletroquímicos na Corrosão nas Ligas da Série 2XXX .....	20
2.4	Efeito da Fragilização por Hidrogênio na Vida do Material .....	22
2.5	Efeito da Razão de Carga (R) na Vida do Material .....	23
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	26
3.1	MATERIAL .....	26
3.2	VIDA EM FADIGA .....	27
3.2.1	CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS EM AR .....	33
3.2.2	CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS EM NÉVOA .....	35
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	40
4.1	ENSAIOS EM AR .....	40
4.2	ENSAIOS EM NÉVOA .....	44
5.	ANÁLISE GERAL .....	48
5.1	ANÁLISE COMPARATIVA DO ENSAIO EM AR .....	48
5.2	ANÁLISE COMPARATIVA DO ENSAIO NÉVOA COM RELAÇÃO AOS EM AR .....	51
6.	CONCLUSÃO .....	54
7.	REFERÊNCIAS .....	55

## 1. INTRODUÇÃO

É fato que tecnologia dos materiais tem avançado muito nos últimos anos devido as demandas de indústrias de alto desempenho. Busca-se cada vez mais ganhos em propriedades mecânicas -como elevada resistência a tração e compressão, tenacidade a fratura e resistência a fadiga- sem que seja elevado de maneira drástica o peso do material e consequentemente do componente acabado.

A propriedade de leveza e resistência associada as ligas de Alumínio tem chamado a atenção em especial do setor aeronáutico, que tem uma preocupação ainda mais sensível no que se refere a peso, propriedades mecânicas, químicas e margens de erro. Atualmente tais ligas estão entre os materiais mais demandados por este setor, estando presentes na fuselagem, asas e teto da grande maioria dos aviões. A aplicação destes materiais em aeronaves faz com que seja estritamente necessários estudos prévios muito detalhados dos materiais que as compõem antes que qualquer componente possa ser de fato inserido em uma aeronave comercializada, uma vez que ocorrência de falhas estruturais pode ter consequência trágicas de grandes proporções.

As falhas causadas por fadiga ou fadiga assistida pelo meio ambiente (corrosão-fadiga) são preocupações constantes dos projetistas aeronáuticos, pois podem ocorrer em tensões mais baixas do que as tensões máximas de tração e compressão que o material é capaz de suportar.

De acordo com a norma American Society for Testing and Materials (ASTM, 2013), fadiga é um processo progressivo, localizado e permanente de falha em um material sujeito a carregamentos cíclicos, que pode gerar trincas devido a concentração de tensões, e como mencionado, pode ocorrer em níveis de solicitações inferiores ao limite de resistência do material, isto é, na região elástica.

Tal processo é caracterizado por três etapas distintas:

- Iniciação da trinca (etapa alvo do estudo proposto): Estágio inicial do processo de fadiga onde acontece a iniciação de uma ou mais microtrincas. Segundo Dieter (1981), as trincas de fadiga geralmente são nucleadas na superfície livre e quando esta ocorre no interior, sempre tem uma interface envolvida. Este estágio é fortemente influenciado pela presença no material de microtrincas, entalhes, riscos, inclusões e/ou precipitados de segunda fase. As

trincas tendem a se deslocar ao longo dos planos de  $45^\circ$ , que possuem maior tensão cisalhante.

- Propagação da trinca: É o avanço em incrementos a cada ciclo de tensão com surgimento de estrias ou "marcas de praia".
- Fratura final: Ocorre quando a trinca atinge seu tamanho crítico e propaga rapidamente resultando na fratura do componente.

É possível notar que os esforços e a superfície do material têm forte influência na sua vida sob fadiga, e sabe-se também, que as características superficiais estão intimamente ligadas, além dos aspectos geométricos, com a interação desta com o ambiente.

Por conta dessa suposta influência do meio no comportamento em fadiga dos materiais, o trabalho proposto visa o estudo da vida da liga de Alumínio AA2524-T3 quando submetida a fadiga e a fadiga assistida pelo meio ambiente (corrosão-fadiga), a fim de entender a influência deste sobre a vida do material.

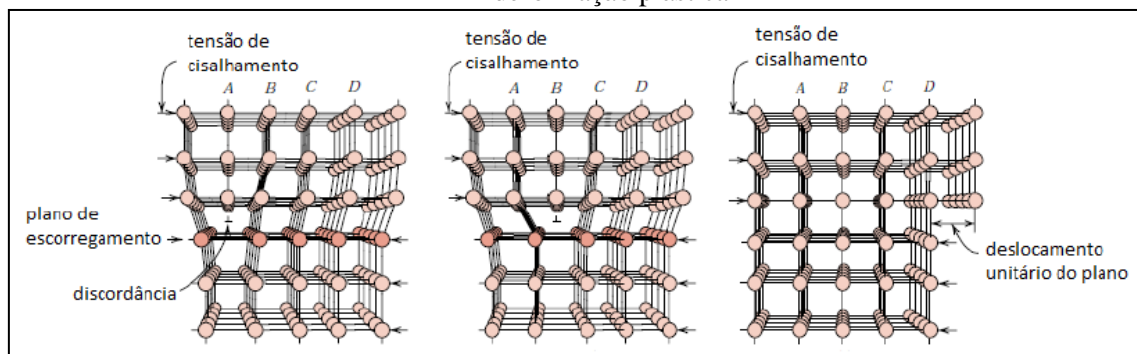
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fadiga

De um modo um pouco mais completo, a ASTM (2013) define fadiga como “um processo de alteração estrutural permanente, localizado e progressivo que ocorre em um material submetido a condições de carregamentos que produzem tensões e deformações flutuantes, em um ou mais pontos e que podem culminar em trincas ou fratura completa, após suficiente número de flutuações”. O processo é progressivo, localizado e cumulativo, desta forma o material é levado à falha por ser impossível sua recuperação após fadiga.

Nos materiais dúcteis como a maioria das ligas de alumínio, a nucleação de trincas por fadiga ocorre quando, devido a tensão, surge a formação de planos de deslizamento provenientes da deformação plástica no grão mais desfavoravelmente orientado. É válido ressaltar que para haver deformação plástica em um material metálico, é necessário que haja o escorregamento de discordâncias. A Figura 1 abaixo representa esquematicamente como esses defeitos se movimentam na estrutura cristalina dos metais.

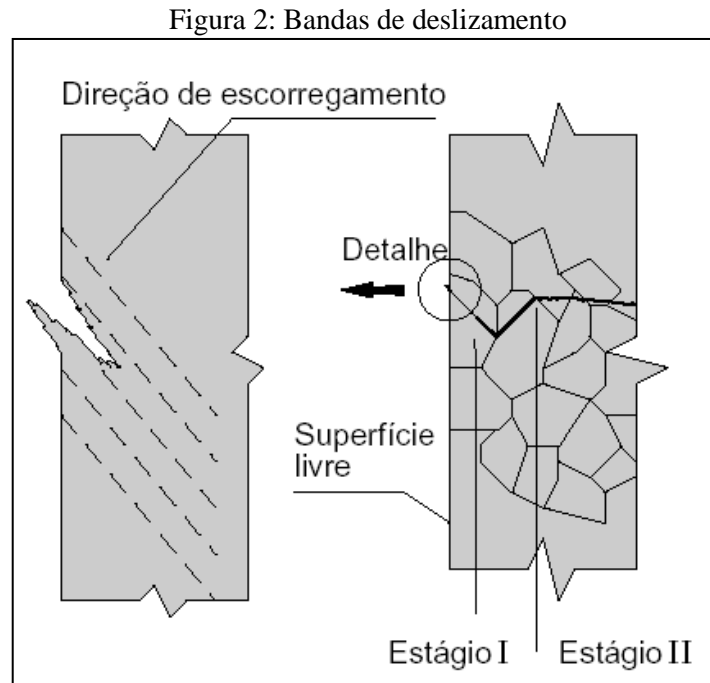
Figura 1: Esquemático sobre o movimento das discordâncias no reticulado cristalino favorecendo a deformação plástica



Fonte: Callister Junior (2006)

A discordância se movimenta atravessando o retículo plano a plano até que chegue a superfície. Com isso, quando várias discordâncias se movimentam nos planos de escorregamento, culminam em pequenas deformações em forma de sulcos na superfície do material, denominadas de intrusões e extrusões. Segundo Redd-Hill (1982), o aumento do número de ciclos de carregamento, torna os sulcos superficiais mais profundos, e as depressões e inclusões adquirem a forma de uma trinca.

Desta forma, trincas em fadiga iniciam-se em singularidades ou descontinuidades e tendem a se deslocar, inicialmente, ao longo de planos a  $45^\circ$ , como exposta na Figura 2 a seguir, ou seja, nos planos de máxima tensão cisalhante.



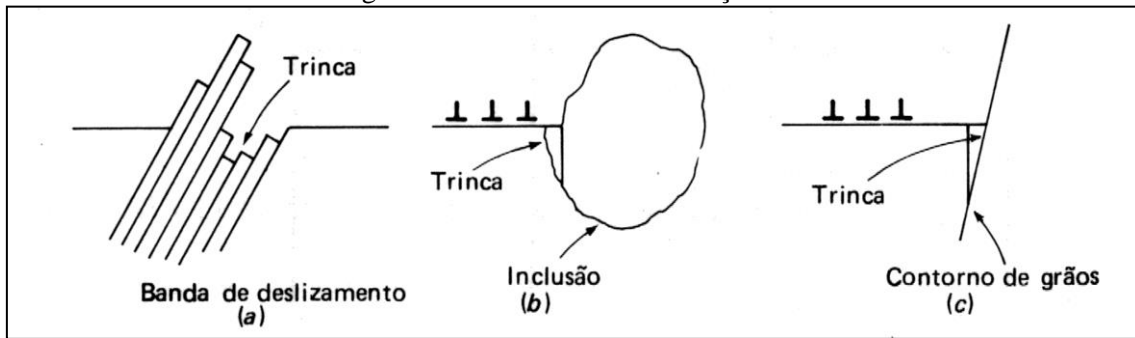
Fonte: Callister Junior (2006)

É válido ressaltar que este tipo de comportamento em um material ocorre com muito mais facilidade em locais onde haja concentradores de tensões como micro trincas, inclusões e mudanças geométricas na seção, expondo assim o quão importante para a vida de um material/componente é seu dimensionamento, o controle do seu processo de fabricação, os esforços envolvidos, o acabamento da peça final e a interface peça/ambiente.

Nos materiais frágeis ou duros, como os aços tratados para obtenção de alta dureza, a nucleação das trincas se inicia na interface entre a matriz-inclusões existentes, ou nos contornos triplos de grãos, já que a matriz não chega a ser deformada plasticamente com os esforços. Tal situação está exemplificada na Figura 3 abaixo.



Figura 3: Mecanismos de nucleação de trincas



Fonte: Dieter (1981)

Uma falha por fadiga ocorre dentro de uma gama bastante ampla de ciclos de carga, que segundo Dowling (2007) vai desde valores da ordem de 10 ciclos até mais de  $10^8$  ciclos. É evidente que o número de ciclos que o componente resiste depende de diversos fatores intrínsecos (propriedades mecânicas, químicas e físicas) e extrínsecos ao material (associados ao meio em que este se encontra, o que influencia nas características de sua superfície, e ao nível de solicitação proposta), o que expõem a necessidade de estudo do material, dos esforços e do meio ao qual este será submetido.

## 2.2 Propriedades de Corrosão-Fadiga em Ligas de Al

É fato que uma falha causada por fadiga assistida por corrosão depende de uma combinação de fatores, como por exemplo o tipo de material, sua microestrutura, tempo, intensidade e forma de aplicação do carregamento, e o meio ao qual o componente está inserido.

Segundo Devereux et al. (1972), em geral a vida em fadiga das ligas de alumínio da série 2xxx e 7xxx é menor se avaliadas em meios mais agressivo como água do mar e soluções salinas (em relação ao ar), especialmente se ensaiadas em baixos níveis de tensão. A amplitude de tensão necessária para causar falha por fadiga tende a diminuir progressivamente com o tempo e com o número de ciclos, pois um ataque corrosivo localizado no material produz concentradores de tensão que diminuem por sua vez o tempo de iniciação de uma trinca.

Segundo Hollingsworth e Hunsicker (1983), o limite em fadiga axial para estas ligas é de cerca de 3 a 4 vezes menor em água do mar e soluções salinas se comparado ao comportamento observado em ar. As ligas da série 2xxx são especialmente sensíveis a meios aquosos contendo íons de cloro, pois neste caso a corrosão por um mecanismo denominado de

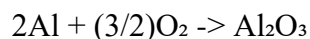
pites de corrosão é favorecida, promovendo o aparecimento de concentradores de tensão que reduzem a vida em fadiga do material.

De acordo com Cottis e Husain (1982), Martin e Talbot (1981), Srivatsan e Sudarshan (1988), mencionados por Gamboni (2011), os mecanismos que relacionam a nucleação de trincas por fadiga em meios agressivos incluem:

1. Formação de pites de corrosão que agem como concentradores de tensão.
2. Ruptura do filme de óxido superficial protetor, em metais passivos, e ataque eletroquímico nos sítios desprotegidos.
3. Ataque eletroquímico preferencial.
4. Redução da energia superficial do metal devido à absorção de espécies químicas do meio, como por exemplo o hidrogênio.

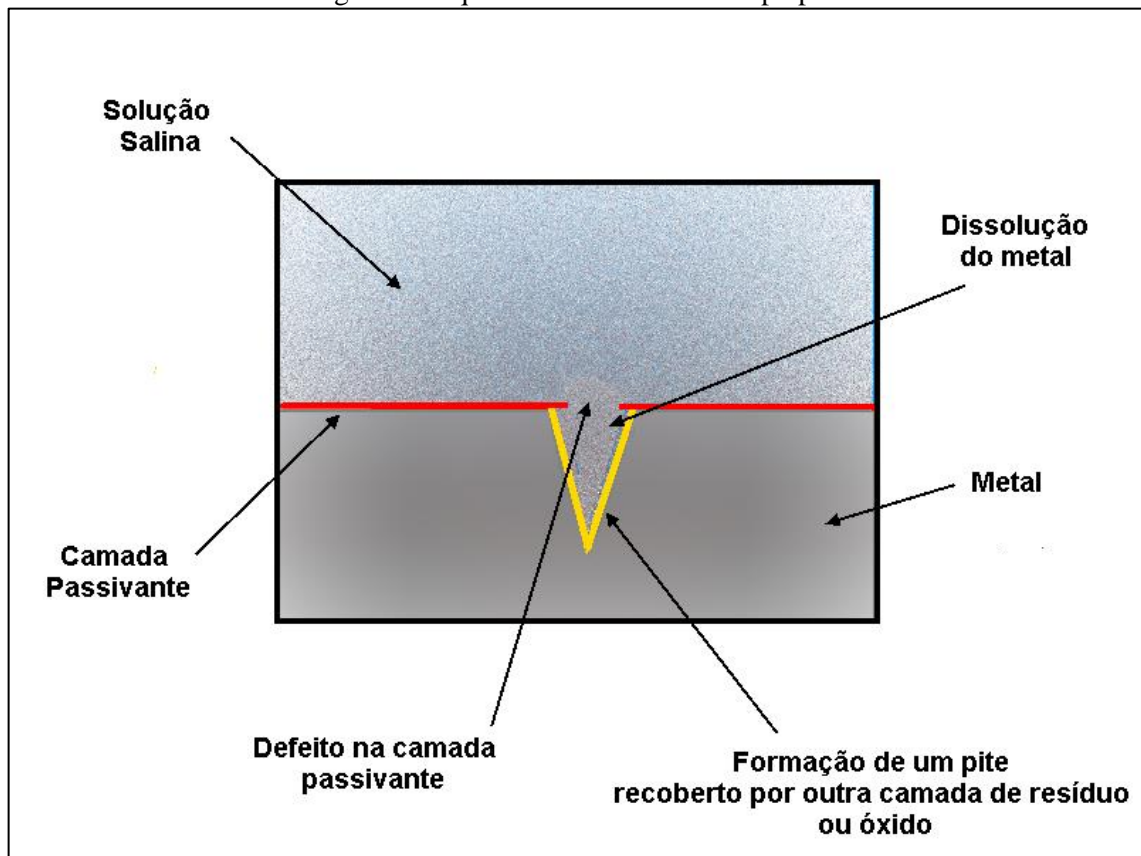
### 2.3 Efeito da Corrosão por Pites na Vida do Material

Sabe-se que o Al é um metal quimicamente muito ativo, mas rapidamente desenvolve um filme natural isolante de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sobre a superfície quando exposto ao oxigênio. Consequentemente, este filme é capaz de proteger o metal contra corrosão em ambientes neutros porque a camada de óxido não permite que os elétrons produzidos por reações de oxidação atinjam a interface entre o óxido e o meio, formando assim uma camada isolante entre o material e o meio e estatizando a corrosão do mesmo. Este filme é gerado espontaneamente de acordo com a oxidação natural do Al metálico de acordo com a seguinte reação:



Caso aconteça algo com este filme inerte gerado espontaneamente, como um dano ou ruptura, tal camada instantaneamente se recompõe em sua forma oxidada (DAVIS, 1999). Os filmes passivos assim formados são frequentemente susceptíveis à ruptura localizada resultando concentradores de tensão de escala nanométrica devido a dissolução acelerada do metal. Tais concentradores de tensão gerados são denominados pites de corrosão e estão representados na Figura 4.

Figura 4: Esquemático do defeito do tipo pite



Fonte: Próprio autor

Dependendo de como inicia o ataque, o metal pode sofrer corrosão por pites ou por fresta: no primeiro caso ocorre iniciando-se em uma superfície aberta e o segundo, em um local fechado, ou seja, em uma célula oclusa. Nas ligas a base de alumínio, a composição também exerce uma considerável influência sobre a resistência à corrosão devido a dois fatores decisivos: (i) a própria composição da camada de óxidos; (ii) a presença de heterogeneidades nos grãos de alumínio que podem afetar a continuidade superficial da camada dos óxidos. Quando se considera o primeiro fator, a adição de cromo, tântalo, zircônio ou nióbio aumenta a resistência à corrosão. Isso parece ocorrer porque seus óxidos restringem o acesso dos ânions através do filme, deslocando o potencial de ruptura para valores mais positivos. Um exemplo para o segundo fator é a precipitação de fases intermetálicas decorrente do processo de fundição e dos tratamentos térmicos ou termomecânicos da liga. As fases intermetálicas endurecedoras como  $\text{Al}_2\text{Cu}_x\text{Mg}_y$ ,  $\text{MgZn}_2$  e  $\text{MgZn}_{1,85}\text{Cu}_{0,15}$  são relativamente fáceis de dissolver em meios aquosos salinos, em particular, as que contêm maior concentração de Mg que dos outros elementos. Isto provoca o

aparecimento de cavidades onde os pites podem ser nucleados e/ou trincas podem ser iniciadas (FOLEY, 1986; SZLARSKA-SMIALOWSKA, 1999).

Então, o diâmetro e a profundidade da cavidade dos pites dependem do metal, da natureza do meio e das condições de trabalho. Alumínio e suas ligas são susceptíveis à corrosão por pites em um pH neutro, o que engloba algumas condições de trabalho, como água natural, água do mar, ou ar. Isto resulta numa possível propagação do pite de acordo com as condições, favoráveis ou não. O fenômeno da corrosão por pites é extremamente complexo, e mesmo com uma série de estudos e publicações ao longo dos anos, seus mecanismos não são totalmente entendidos. Apesar disso, sabe-se com clareza que o fenômeno de corrosão por pites demonstra duas fases distintas: iniciação e propagação dos pites.

Enfatizando a parte de iniciação dos pites como propõe o trabalho, é conhecido que este tipo de corrosão é causado pela ação localizada de íons agressivos, na sua maioria em um meio no qual o filme passivante não é estável, ou seja, condições desfavoráveis de pH – segundo Nisancioglu (1992). Estes íons são adsorvidos pela superfície do metal, seguido pela ruptura do filme passivante em pontos mais fracos, ocasionando microtrincas, com nanômetros de largura. Com apenas pouco tempo de exposição, algumas ligas já possuem um grande número de densidade de pites. A grande maioria dos pites para de crescer após vários dias de exposição. Alguns estudos ligados à polarização demonstram que quando estes pites param de crescer, eles voltam a ser passivados e quando polarizados novamente, eles não crescem mais, mas sim, inicia-se novamente um crescimento de novos sítios de nucleação de pites. Por conta disso, a análise do comportamento deste material quando exposto ao ar ou a um meio salino (fadiga-corrosão) se faz de extrema importância ao passo que pode ajudar a determinar a vida útil de diversos componentes, em especial componentes de aeronaves que transladam entre regiões continentais e marítimas como citados anteriormente, a fim de evitar falhas fatais em diversos casos.

## 2.4 Efeitos Eletroquímicos na Corrosão nas Ligas da Série 2XXX

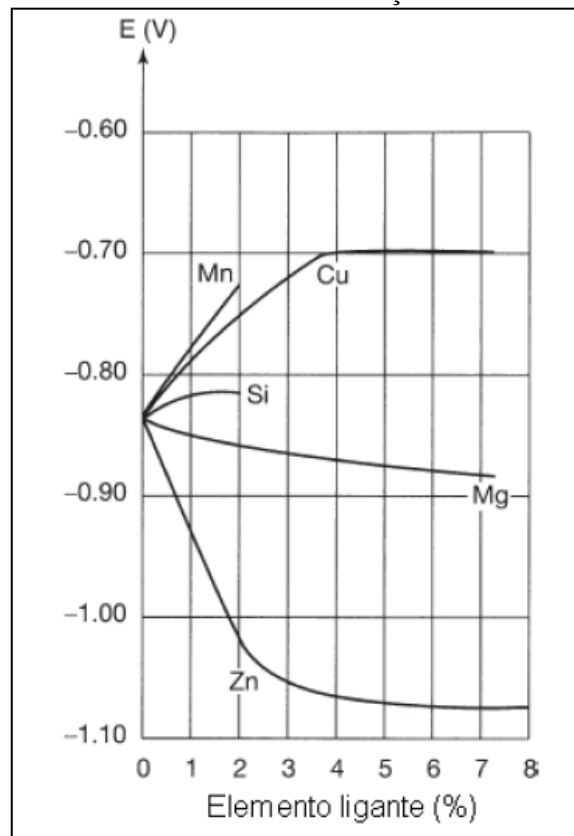
As ligas de alumínio da série 2xxx apresentam o Cu como principal elemento de liga, sendo assim são mais susceptíveis a corrosão do que as ligas de outras séries que possuem menores quantidades deste elemento. A presença de partículas de precipitados intermetálicos, acarreta corrosão localizada (pites), corrosão intergranular e esfoliação. Em ligas da série

2xxx, existem dois tipos de partículas de intermetálicos que podem causar corrosão por pites:  $\text{Al}_6(\text{CuFeMn})$  e  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ . Estas partículas possuem potenciais diferentes da matriz, formando assim células galvânicas localizadas (WEI; LIAO; GAO, 1988).

Além disto, os efeitos eletroquímicos podem ser maiores nestas ligas do que em outras por dois fatores: maior mudança do potencial do eletrodo com variações na quantidade de cobre na solução sólida e, sob mesmas condições a presença de não uniformidade na solução sólida. Isso ocorre devido à criação de células galvânicas pela formação de minúsculas partículas de cobre ou filmes depositados na superfície da liga como resultado de corrosão. Depois de iniciado um processo de corrosão, os íons de cobre, que anteriormente se encontravam na liga, formam uma cobertura no material, dando origem a um cátodo metálico. A redução dos íons de cobre e o aumento da eficiência da reação de redução de  $\text{O}_2$  e  $\text{H}^+$ , aceleram a taxa de corrosão (HOLLINGSWORTH; HUNSICKER, 1987).

Como visto, é fato que os elementos de liga influenciam nas reações eletroquímicas espontâneas que podem ocorrer em determinado material, contudo, tais elementos também afetam diretamente no potencial de corrosão das ligas de Al. A Figura 5 abaixo expõem esse efeito no potencial de corrosão, em função do tipo de elemento de liga presente.

Figura 5: Potencial de corrosão em função do elemento de liga



Fonte: Hollingsworth e Hunsicker (1987)

Sendo as ligas da série 2xxx ricas no elemento de liga Cu, podemos perceber que estas apresentam maior potencial de corrosão, logo, estarão mais sujeitas a falhas em ambientes corrosivos, principalmente se o cobre estiver em uma fase precipitada.

## 2.5 Efeito da Fragilização por Hidrogênio na Vida do Material

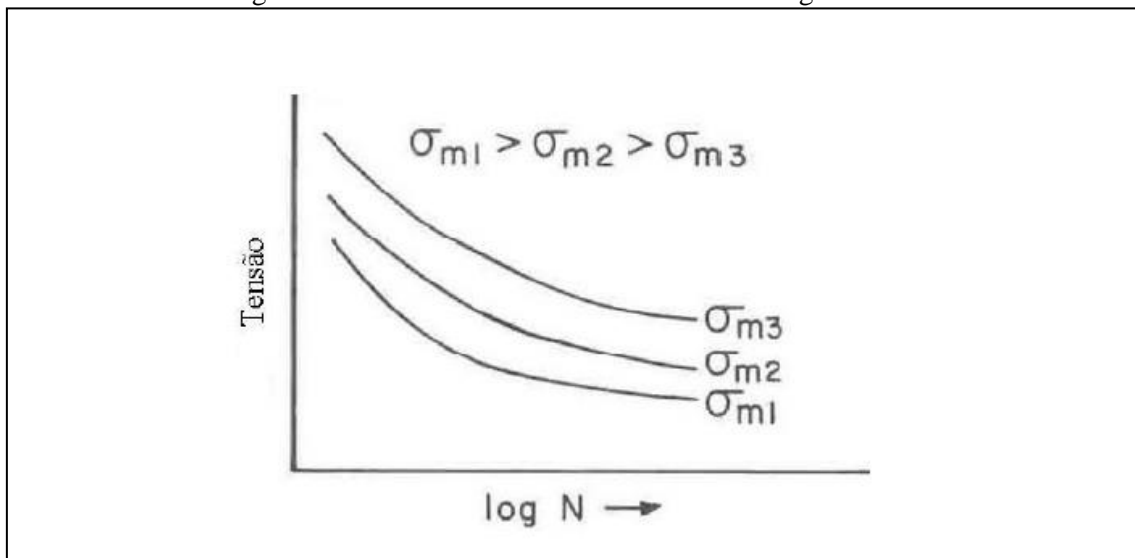
Outro problema passível de ocorrer em ligas de Al em meios iônicos é o fenômeno de corrosão sob tensão, e para tanto um dos principais mecanismos é a fragilização por hidrogênio. Tal fragilização é causada pela difusão do mesmo de forma iônica,  $H^+$ , para o interior da trinca, fato que produz tensões que levam o material a uma fratura localizada que dá origem a diversas outras trincas (RODRIGUES; MIRANDA, 1994). As trincas superficiais que surgem, são nucleadas e progridem com o tempo logo após a hidrogenação.

De acordo com Davis (1999), este mecanismo só é aplicado em ambientes úmidos. Em atmosferas secas, as taxas de difusão e de solubilidade do hidrogênio no Al são muito baixas, e podem ser desconsideradas para contabilização da vida.

## 2.6 Efeito da Razão de Carga (R) na Vida do Material

Outro fator de importância a ser considerado quando se analisa a vida de um material sujeito a fadiga é a razão de tensão, ou razão de carga, R. Sabe-se que para o fenômeno da fadiga ocorrer, o material em trabalho ou em teste, deve estar sujeito a tensões cíclicas, desta forma, o mesmo será submetido a uma tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ), a uma tensão mínima ( $\sigma_{m\acute{i}n}$ ) e a uma tensão média ( $\sigma_m$  ou  $S_m$ ), esta última sendo obtida a partir da média aritmética entre os valores de tensão máxima e mínima. Esta tensão média se positiva tende a diminuir a vida em fadiga dos materiais em relação a uma tensão média igual a zero como pode ser observado na Figura 6 abaixo.

Figura 6: Efeito da tensão média na vida em fadiga dos materiais



Fonte: Rabbi (1998)

Sendo assim, a razão de carga se apresenta como:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (\text{Equação 1})$$

O tempo de trabalho do corpo em teste tende a ser menor em casos onde  $\sigma_m$  é maior que zero e quando o valor de R é inferior a um R nulo. Tal situação se explica, pois quando o

valor de  $R$  é maior que  $-1$ , maior será o caráter trativo do ensaio, logo maiores serão as chances de ocorrer planos de deslizamento e então surgirem deformações plásticas e nucleação de trincas pelo deslocamento das discordâncias presentes como já mencionado anteriormente, culminando assim em uma menor vida da amostra.





### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Material

Como mencionado anteriormente, o material estudado foi uma liga de Alumínio-Cobre AA2524, trabalhada a frio para aumentar a resistência mecânica após solubilização (T3), amplamente aplicada no setor aeronáutico.

A Tabela 1 abaixo apresenta sua composição química.

Tabela 1: Composição química (% em peso) da liga 2524 T3

<b>Elemento</b>	<b>Máximo Especificado (%wt)</b>	<b>Experimental</b>
Alumínio	Base	base
Cobre	4,00 - 4,5	3,84
Magnésio	1,20 - 1,60	1,312
Manganês	0,45 - 0,70	0,56
Ferro	0,12 Max.	0,06
Silício	0,06 Max.	0,04
Zinco	0,15 Max.	0.01
Titânio	0,10 Max.	0.029
Cromo	0,05 Max.	ND
ND – Não detectado		

Fonte: Gamboni (2011)

Gamboni (2011) investigou as propriedades de tração em temperatura ambiente e obteve os resultados coerentes com a Norma AMS 4296, cujos valores mínimos para estão listados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de tração da liga 2524-T3

Liga	$\sigma_y (MPa)$	$\sigma_r (MPa)$	E(GPa)	%Al
Gamboni (2011)	340,3	445,4	81	19,7
Norma AMS 4296	304	407	-	15

Fonte: Gamboni (2011)

A liga 2524 possui alta tenacidade e elevada resistência a propagação de trincas por fadiga se comparada a outras ligas da série 2xxx, apresentando também como ponto forte um baixo valor de densidade de 2,8 g/cm<sup>3</sup> (DAVIS, 1993). O estudo da vida em fadiga é de grande importância para o desenvolvimento tecnológico nacional.

### 3.2 Vida em Fadiga

Para a análise da nucleação das trincas por fadiga na liga de alumínio em estudo, realizou-se ensaios de fadiga seguindo os padrões estipulados pelas normas ASTM E468-11 e ASTM E739-10, a fim de que a partir de tais ensaios possamos levantar as Curvas de Wöller (S-N) e analisar os resultados obtidos. O projeto como um todo conta com ensaios em ar e em névoa salina (concentração 3,5% de NaCl), onde foram utilizadas duas razões de carga (R) (0,1 e 0,5) e frequências de 10 Hz, para as condições ambiente e névoa salina. Utilizou-se um controle de carga, com amplitude constante de carregamento e ondas senoidais.

A análise proposta neste relatório também conta com uma comparação dos resultados obtidos em ar, com resultados obtidos no mesmo ambiente, porém com razão de carga distinta por Gamboni (2011). A Tabela 3 abaixo representa a matriz dos ensaios realizados.

Tabela 3: Matriz dos ensaios a serem realizados esta apresentada abaixo

Número do Ensaio	Quantidade de Corpos de Prova	Níveis de tensão	Ambiente
1	9	4	Ar
2	6	3	Névoa

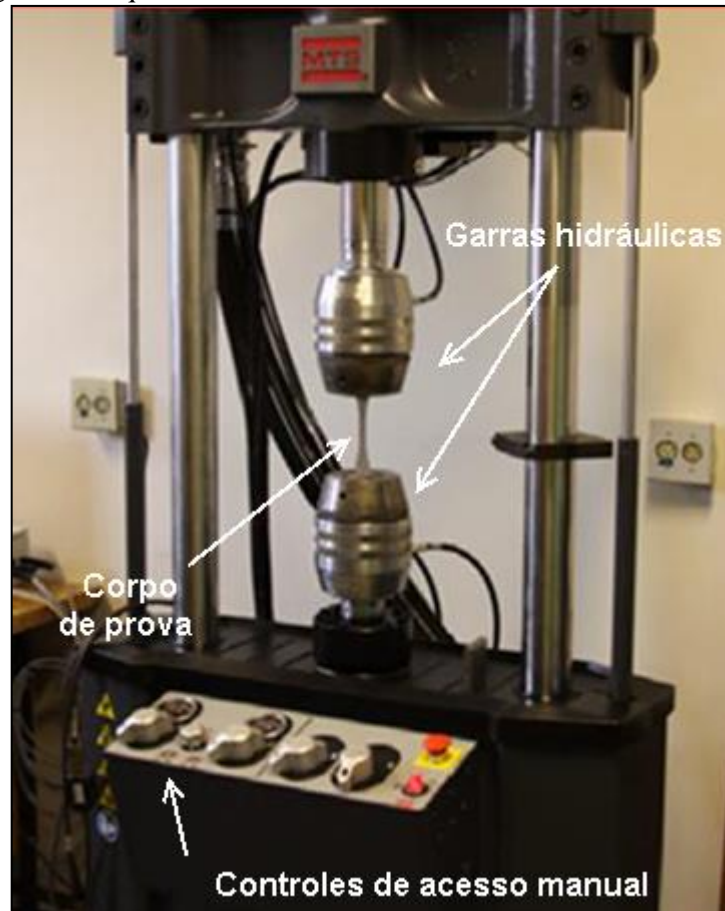
Fonte: Próprio autor

Com estes parâmetros, pôde-se encontrar o percentual de replicabilidade dos ensaios, de acordo com a equação 2 (ASTM, 2010) a seguir.

$$\% \text{ replicabilidade} = 100 * \left[ 1 - \left( \frac{\text{n}^\circ \text{ de níveis de tensão}}{\text{n}^\circ \text{ total de corpos de prova}} \right) \right] \quad (\text{Equação 2})$$

Todos os ensaios serão realizados em sistema de ensaios dinâmicos em uma máquina da marca MTS com modelo Landmark de 100 kN de capacidade conforme exposto na Figura 7, atuando independentemente nos testes efetuados em ar e agindo em conjunto com aparato específico para controle de atmosfera no caso dos ensaios em névoa.

Figura 7: Máquina marca MTS servohidráulica Landmark de 100 kN



Fonte: Próprio autor.

O sistema de ensaio possui acionamento hidráulico das garras para fixação do corpo de prova, desta forma para realização dos ensaios as garras devem ser abertas, o corpo de prova posicionado de modo a ficar em posição vertical e entre as pinças, para que então as garras superior e inferior possam ser fechadas fixando o corpo alinhado em relação ao eixo de carregamento da máquina. Fixado o corpo de prova, são fornecidos os dados de entrada ao programa computacional, tais como: a amplitude de carga, a carga média, o tipo de onda a ser aplicado (neste trabalho sempre senoidal), a frequência e o número máximo de ciclos que

corresponde a vida infinita estabelecida (foi adotado  $10^7$  ciclos). Se caso o corpo de prova não romper nesta ciclagem, o ensaio é parado.

Como dado de saída da máquina se obtém o número de ciclos que o corpo de teste resistiu antes de seu rompimento por fadiga, ou no caso de não rompimento na ciclagem estabelecida como máxima, obtém-se o chamado “run out” de ciclos.

Os dados relativos aos ensaios de fadiga são armazenados no computador que controla o ensaio e posteriormente puderam ser acessados e processados em programas gráficos específicos.

Geralmente, os dados obtidos dos ensaios para determinação da vida em fadiga, são obtidos com valores de  $R = -1$ , ou seja,  $\sigma_m = 0$ . Como neste caso os ensaios foram realizados para  $R = 0,1$  e  $0,5$ , será utilizada a relação de Smith, Watson e Topper, SWT, para se fazer as correções pra  $R = -1$ . Assim, para cada nível de amplitude de tensão aplicada, será obtido o valor de  $\sigma_{ar}$  - (Equação 3), que é a amplitude de tensão equivalente para a tensão média igual zero, para uma determinada amplitude de tensão real  $\sigma_a$  e com tensão média  $\sigma_{méd} \neq 0$  (Equação 4).

$$\sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{máx} * \sigma_a} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\sigma_{méd} = \frac{\sigma_{mín} + \sigma_{máx}}{2} \quad (\text{Equação 4})$$

Para a utilização de tais equações, o trabalho partiu de valores pré-definidos para amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ) e para relação de tensão ( $R$ ), a fim de que análises comparativas pudessem ser tecidas.

Com tais tensões calculadas, foi necessário também o cálculo das forças associadas ao ensaio para que tais parâmetros pudessem ser informados no programa de computador para o controle das cargas dos ensaios. Para tanto foram feitas as medições das dimensões do corpo de prova, para realização do cálculo da área de secção transversal do corpo de prova ( $A_{cp}$ ). Buscando menores erros, realizou-se três medidas em cada dimensão -cada uma em um ponto

diferente do corpo de teste- da secção e então foi feito a média das mesmas. Assumiu-se tal média como a medida mais precisa das dimensões da secção transversal e assim pode ser calculado a área de interesse segundo a Equação 5.

$$A_{cp} = l_{cp} * c_{cp} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde  $l_{cp}$  é a largura da secção transversal do corpo de prova e  $c_{cp}$  é o comprimento da secção transversal do mesmo.

Desta forma, utilizando as equações de força máxima -  $P_{m\acute{a}x}$  - (Equação 6), força mínima -  $P_{m\acute{i}n}$  - (Equação 7), força média -  $P_{m\acute{e}d}$  - (Equação 8) e força de amplitude -  $P_a$  - (Equação 9) expostas abaixo, associados a área mencionada ( $A_{cp}$ ) foi possível extrair os valores das forças a serem utilizadas projeto.

$$P_{m\acute{a}x} = \sigma_{m\acute{a}x} * A_{cp} \quad (\text{Equação 6})$$

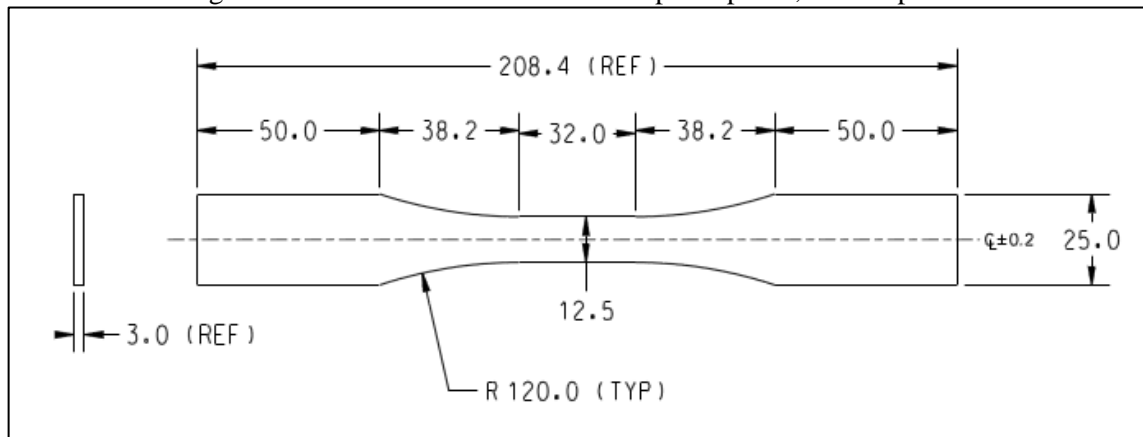
$$P_{m\acute{i}n} = \sigma_{m\acute{i}n} * A_{cp} \quad (\text{Equação 7})$$

$$P_{m\acute{e}d} = \sigma_{m\acute{e}d} * A_{cp} \quad (\text{Equação 8})$$

$$P_a = \sigma_a * A_{cp} \quad (\text{Equação 9})$$

O modelo de corpo de prova a ser utilizado em todos os ensaios de fadiga propostos será de seção retangular denominado “dog bone”. Abaixo este se encontra dimensionado esquematicamente na Figura 8 conforme previsto na norma.

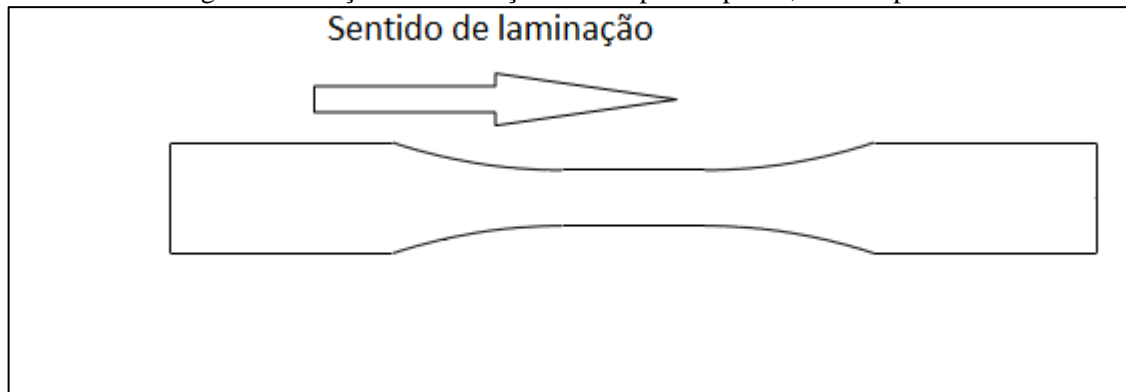
Figura 8: Geometria e dimensões do corpo de prova, vista superior



Fonte: Gamboni (2011)

Todos os corpos de provas foram retirados da mesma chapa de alumínio, com uma mesma direção de alinhamento parcial dos grãos (LT) conforme sentido de laminação como se vê na Figura 9 abaixo.

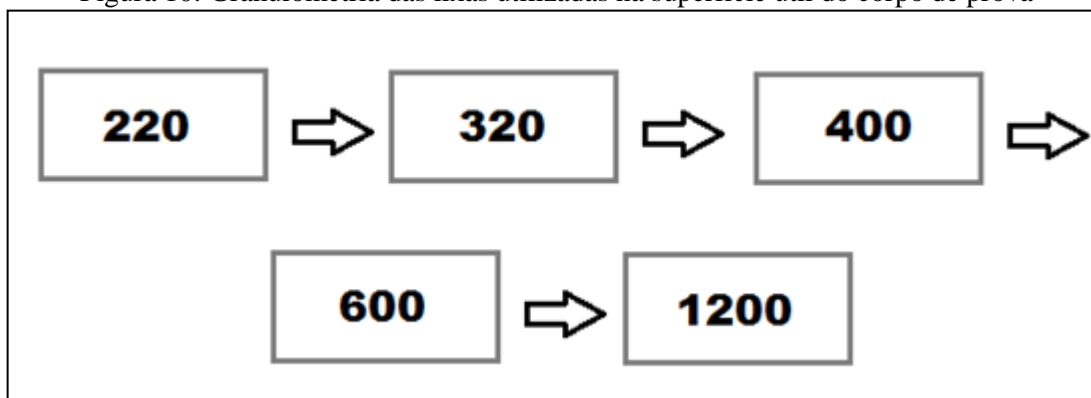
Figura 9: Direção de laminação dos corpos de prova, vista superior



Fonte: Próprio autor

Tendo conhecido o corpo de prova em questão e os equipamentos a serem utilizados nos testes, pode-se iniciar o processo de ensaio. Com os corpos de prova já usinados por eletroerosão a fio, foi possível dar início ao processo de lixamento para obtenção da superfície útil desejada. Para isso todos os corpos de teste foram submetidos sequencialmente as lixas com granulometria apresentadas no Figura 10 abaixo.

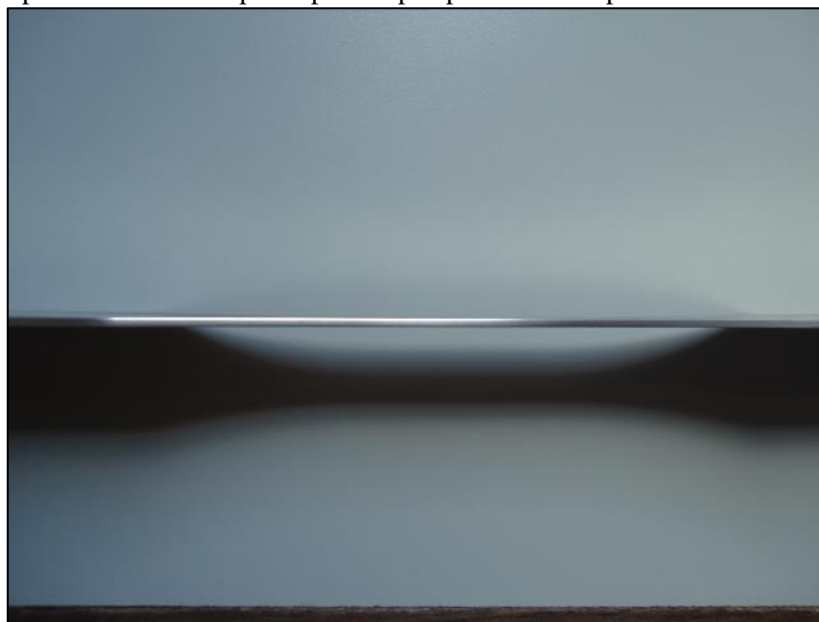
Figura 10: Granulometria das lixas utilizadas na superfície útil do corpo de prova



Fonte: Próprio autor

Com tal procedimento, o resultado de acabamento superficial obtido está apresentado na Figura 11 a seguir.

Figura 11: Superfície útil do corpo de prova após processo completo de lixamento, vista lateral



Fonte: Próprio autor

Após o lixamento, utilizou-se três corpos de prova do lote que foi preparado para registrar medidas de rugosidade, a fim de notar se um padrão de acabamento foi seguido. Tal teste foi realizado em um rugosímetro de bancada da marca Taulor-Hobson, do modelo Talusurf-10. As medidas foram realizadas em pontos diferentes da superfície útil do corpo de prova a fim de identificar se a preparação estava sendo bem executada e se esta seguia um padrão ao longo da área de interesse, fazendo com que o lixamento discrepante não se tornasse um fator que pudesse mascarar os resultados finais. Os valores obtidos estão



expostos na Tabela 4 a seguir, e atestam que o lixamento está correto, uma vez que as medidas não apresentam diferença significativa.

Tabela 4: Rugosidade dos corpos de prova amostrais

Corpo de Prova	Rugosidade (Ra) em $\mu\text{m}$
1	0,145
	0,130
	0,160
2	0,130
	0,200
	0,140
3	0,190
	0,150
	0,170

Fonte: Próprio autor

### 3.2.1 Características ds Ensaio em Ar

Conhecendo os aspectos gerais da metodologia dos ensaios como por exemplo o embasamento teórico, a quantidade de ensaios, rugosidade, lixamento, o maquinário geral utilizado e as dimensões de projeto dos corpos de prova, agora serão apresentados os métodos mais específicos de cada ensaio. Começando pela apresentação dos parâmetros que foram pré-estipulados para os ensaios em ar como mencionado anteriormente. Estes se encontram expostos na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Parâmetros pré-definidos para ensaios de fadiga em ar

Número do ensaio	Corpo de prova	R	Meio	Frequência (Hz)	$\sigma_a$ (MPa)
1	1	0,5	Ar	50	50
1	2	0,5	Ar	50	50
1	3	0,5	Ar	50	65
1	4	0,5	Ar	50	65
1	5	0,5	Ar	50	75
1	6	0,5	Ar	50	75
1	7	0,5	Ar	50	85
1	8	0,5	Ar	50	85

Fonte: Próprio autor

Em sequência, com o acabamento superficial pronto para todos os corpos de teste, foi possível extrair as características dimensionais dos corpos de prova do lote de ensaios em ar, e então montar uma planilha de cálculos contendo as dimensões da secção transversal do mesmo atrelado ao cálculo das médias dimensionais e da área de secção transversal de fato. A Tabela 6 expõem as dimensões mencionadas.

Tabela 6: Características dimensionais dos corpos de prova ensaiados em ar

Corpo de prova	Comprimento 1 (mm)	Comprimento 2 (mm)	Comprimento 3 (mm)	Comprimento médio (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura média (mm)	A (mm <sup>2</sup> )
1	1,31	1,32	1,3	1,31	11,94	11,97	11,99	11,97	15,70
2	1,31	1,3	1,3	1,30	12,21	12,49	12,33	12,34	16,09
3	1,34	1,31	1,32	1,32	11,96	12,03	12,16	12,05	15,95
4	1,33	1,3	1,29	1,31	12,37	12,34	12,31	12,34	16,12
5	1,31	1,31	1,32	1,31	12,18	12,16	12,31	12,22	16,04
6	1,31	1,32	1,31	1,31	12,42	12,52	12,51	12,48	16,39
7	1,32	1,34	1,33	1,33	11,91	12,00	12,22	12,04	16,02
8	1,31	1,32	1,32	1,32	12,15	12,07	11,97	12,06	15,88
9	1,31	1,31	1,31	1,31	12,41	12,40	12,38	12,40	16,24

Fonte: Próprio autor.

Sendo assim, tendo os valores pré-definidos, e as dimensões físicas dos corpos, foi possível elaborar uma planilha com todos os cálculos de forças e tensões dos ensaios.

É válido destacarmos que o equipamento utilizado para os ensaios em condições ambiente é exatamente o descrito no item 3.0 Metodologia, uma vez que para estes, não foi necessário a utilização de nenhum equipamento extra acoplado a máquina MTS com modelo Landmark de 100 kN.

### 3.2.2. Características dos Ensaios em Névoa

Já para os ensaios em névoa, os parâmetros que foram pré-estipulados para os ensaios se encontram expostos na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7: Parâmetros pré-definidos para ensaios de fadiga em névoa

Número do ensaio	Corpo de prova	R	Meio	Frequência (Hz)	$\sigma_{amp}$ (MPa)
2	10	0,5	Névoa salina (3,5% NaCl)	5	50
2	11	0,5	Névoa salina (3,5% NaCl)	5	50
2	12	0,5	Névoa salina (3,5% NaCl)	5	65
2	13	0,5	Névoa salina (3,5% NaCl)	5	65
2	14	0,5	Névoa salina (3,5% NaCl)	5	75
2	15	0,5	Névoa salina (3,5% NaCl)	5	75

Fonte: Próprio autor

Sendo assim, com acabamento superficial pronto para todos os corpos de teste deste lote, foi possível obter as características dimensionais dos 6 corpos de prova reservados para ensaios em névoa, e então compor a planilha de cálculos contendo as dimensões da secção transversal do mesmo e com o cálculo das médias dimensionais e da área de secção. A Tabela 8 apresenta esses dados.

Tabela 8: Características dimensionais dos corpos de prova ensaiados em névoa salina

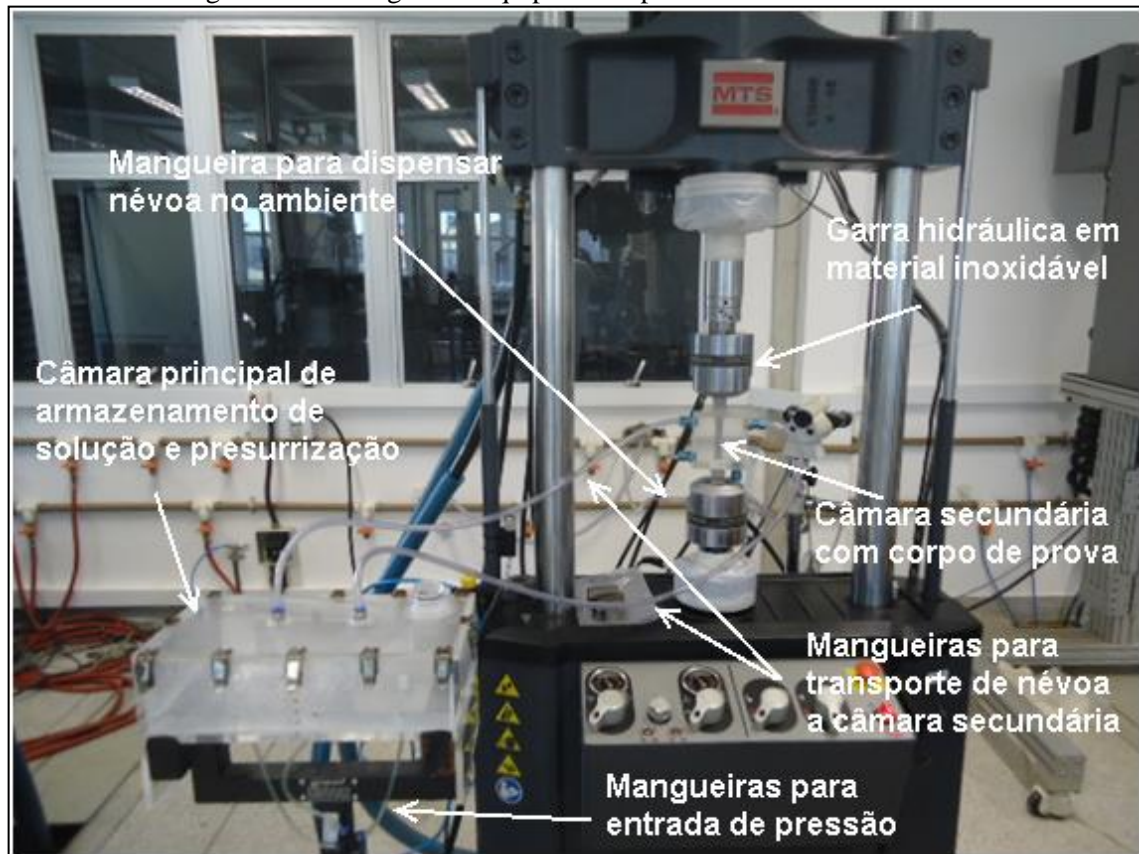
Corpo de prova	Comprimento 1 (mm)	Comprimento 2 (mm)	Comprimento 3 (mm)	Comprimento méd (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura média (mm)	A (mm <sup>2</sup> )
10	1,29	1,28	1,28	1,28	12,33	12,34	12,30	12,32	15,81
11	1,3	1,28	1,29	1,29	12,32	12,30	12,33	12,32	15,89
12	1,28	1,29	1,27	1,28	12,33	12,35	12,33	12,34	15,79
13	1,29	1,27	1,28	1,28	12,33	12,34	12,32	12,33	15,78
14	1,28	1,28	1,29	1,28	12,37	12,40	12,46	12,42	15,94
15	1,27	1,29	1,28	1,28	12,44	12,41	12,39	12,41	15,89

Fonte: Próprio autor

Com isso, tendo os valores pré-definidos e as dimensões dos corpos de prova, pode-se calcular todas as forças e tensões associadas aos ensaios em meio de névoa.

Como já destacado, o ensaio descrito nesta seção difere com relação ao descrito na seção 3.1 com relação ao meio em que o material está exposto. Neste caso uma solução de névoa salina com concentração em massa de 3,5% de NaCl foi formada, e os corpos de prova foram submetidos as cargas propostas nesse meio crítico. Para tanto, o equipamento para estes ensaios foi uma máquina MTS, modelo Landmark de 100 kN para aplicação das cargas cíclicas, e acoplado a ela, uma câmara pressurizada para receber a solução água + NaCl, de modo que o líquido salino fosse aspergido e por meio da pressão interna desta câmara, a solução agora em formato de névoa, fosse transportada por canais poliméricos para uma câmara secundária com a função de manter um fluxo de névoa salina em contato com o corpo de prova. Assim, a névoa saía da câmara principal, se deslocava a câmara secundária onde entrava em contato com o corpo de prova, e em seguida era liberada ao ambiente, de modo que um fluxo salino constante pudesse ser estabelecido sobre o corpo de prova. Tal esquema de montagem está apresentado na Figura 12 abaixo.

Figura 12: Montagem do equipamento para ensaio em névoa salina



Fonte: Próprio autor

Antes de que o ensaio fosse iniciado, foi realizado um teste para que fosse estimada a vazão volumétrica de névoa por unidade de tempo. Para isso, todo aparato foi montado conforme descrito anteriormente, uma quantidade de solução de 2L foi adicionada a câmara principal e a pressão desta foi ajustada em 60kPa. Desta forma, notou-se que em 16h, 0,4L foi perdido ao ambiente. Com tais informações e com a Equação 12 a seguir, obtivemos:

$$Vazão\ volumétrica = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (\text{Equação 12}),$$

onde  $\Delta V$  é a variação do volume (em  $m^3$ ) e  $\Delta t$  é a variação do tempo (em s). Assim a vazão volumétrica de névoa do ensaio foi fixada em  $0,694 * 10^{-7} m^3/s$ .



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como primeiro resultado e aplicável a ambos os ensaios, pode-se apresentar o cálculo dos percentuais de replicabilidade dos testes. Tais percentuais estão expostos na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9: Percentuais de replicabilidade dos ensaios

Número do Ensaio	Meio	Percentual de Replicabilidade
1	Ar	56%
2	Névoa	50%

Fonte: próprio autor

### 4.1 Ensaios em Ar

Foram calculados os valores de tensão máxima, mínima, média e de tensão equivalente,  $\sigma_a$ , e os valores são apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Valores de tensão calculados para os ensaios em ar

Corpo de prova	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{min}}$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_{ar} (\sigma_m=0)$ (MPa)
1	200	100	150	50	100
2	200	100	150	50	100
3	260	130	195	65	130
4	260	130	195	65	130
5	300	150	225	75	150
6	300	150	225	75	150
7	340	170	255	85	170
8	340	170	255	85	170

Fonte: Próprio autor



Tendo os valores de tensões expostos acima, as dimensões como apresentado Tabela 6, foi possível calcular as cargas a serem programadas no maquinário de ensaio para que as forças envolvidas fossem de acordo com o definido. Os valores obtidos estão expostos na Tabela 11 abaixo. É válido mencionar que o corpo de prova de número 9 apresenta valores nulos pois este corpo de prova foi usado para regulagem do equipamento, logo o resultado obtido no ensaio deste corpo foi descartado.

Tabela 11: Cargas aplicados nos ensaios em ar

Corpo de prova	P <sub>máx</sub> (kN)	P <sub>mín</sub> (kN)	P <sub>méd</sub> (kN)	P <sub>a</sub> (kN)
1	3,135	1,568	2,351	0,784
2	3,217	1,609	2,413	0,804
3	4,146	2,073	3,110	1,037
4	4,192	2,096	3,144	1,048
5	4,813	2,407	3,610	1,203
6	4,918	2,459	3,689	1,230
7	5,446	2,723	4,084	1,361
8	5,400	2,700	4,050	1,350
9	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Próprio autor

Com esses valores foi possível realizar todos os ensaios em ar, e a vida em fadiga obtida para cada nível de amplitude de tensão, razão de carga e a amplitude de tensão equivalente fornecida pela equação de Smith-Watson-Topper. Estes valores são apresentados na Tabela 12.

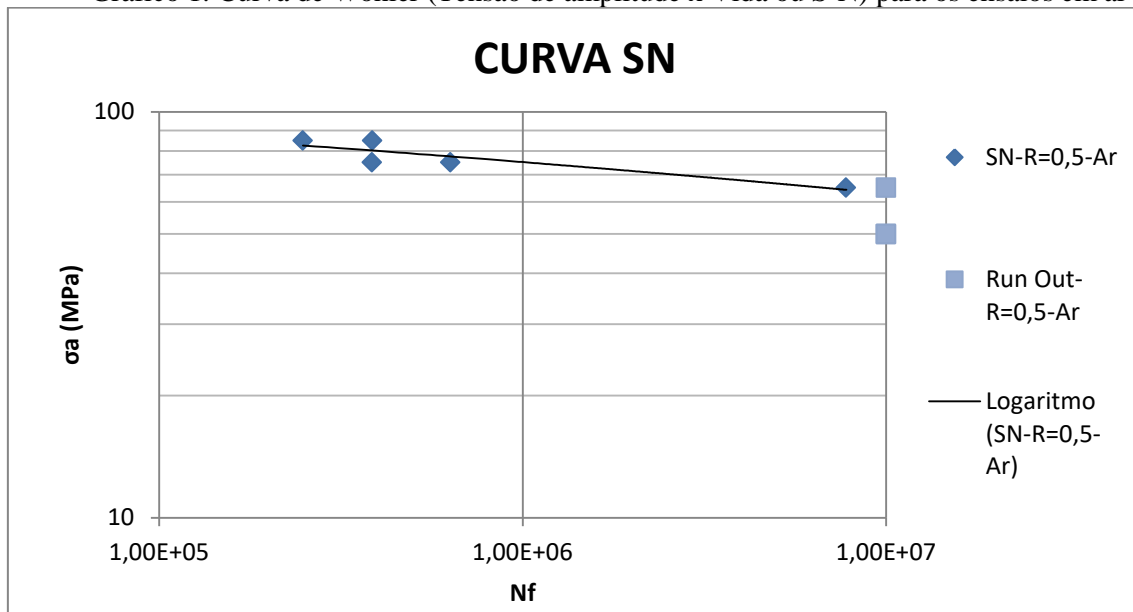
Tabela 12: Número de ciclos necessário para fratura de cada corpo de prova ensaiado em ar

Corpo de prova	R	$\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_{ar}$ (MPa)	Nf (ciclos)
1	0,5	50	100	run out ( $10^7$ )
2	0,5	50	100	run out ( $10^7$ )
3	0,5	65	130	run out ( $10^7$ )
4	0,5	65	130	7771218
5	0,5	75	150	632879
6	0,5	75	150	385247
7	0,5	85	170	248619
8	0,5	85	170	385923

Fonte: Próprio autor

Para melhor visualização dos resultados tais dados também se encontram Gráfico 1 abaixo juntamente com uma linha de tendência para prever comportamentos mais longínquos do material.

Gráfico 1: Curva de Wohler (Tensão de amplitude x Vida ou S-N) para os ensaios em ar



Fonte: Próprio autor

Onde no Gráfico 1 os pontos azulados correspondem exatamente aos resultados dos ensaios e a linha preta representa a linha de tendência destes. Os pontos azuis claro correspondem aos pontos onde o ensaio foi parado (run out) por alta ciclagem, ou seja, sem o rompimento do corpo de prova.

Outro resultado válido de se apresentar nesta seção é a equação da curva gerada pelas tensões de amplitude corrigidas por SWT versus a vida do material. Conhecendo a equação que relaciona tensão corrigida e vida

$$\sigma_{ar} = C * (2Nf)^m \quad \text{Equação 13,}$$

e tendo diferentes valores de  $\sigma_{ar}$  (amplitude de tensão para  $\sigma_m = 0$ ) e de  $N_f$  (vida) obtidos nos ensaios, é possível a partir de um sistema de equações de duas variáveis obter os valores de  $C$  e  $m$ . Neste caso em especial obtivemos  $C = 4,7250 * 10^8$  e  $m = -0,0779$ , aonde  $\sigma_{ar}$  foi dado em Pascal (Pa) e o número de ciclos em ciclos. Assim, a equação da curva é dado por:

$$\sigma_{ar} = 4,7250 * 10^8 * (2Nf)^{-0,0779} .$$

## 4.2 Ensaios em Névoa

Para os ensaios em névoa, as equações utilizadas para os cálculos de tensões e forças associadas ao ensaio foram as mesmas das descritas na seção 4.1 para os ensaios em ar. Para o cálculo da tensão foram utilizadas as equações 3, 4, 5 e 6 e para o cálculo das cargas utilizou-se as equações 8, 9, 10 e 11. Os resultados obtidos para tensão e força estão expostos na Tabelas 13 e 14, respectivamente abaixo.

Tabela 13: Tensões associadas ao ensaio em névoa salina

Corpo de prova	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{amp}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{ar}} (\sigma_{\text{m}}=0)$ (MPa)
10	200	100	150	50	100
11	200	100	150	50	100
12	260	130	195	65	130
13	260	130	195	65	130
14	300	150	225	75	150
15	300	150	225	75	150

Fonte: Próprio autor

Tabela 14: Cargas associadas ao ensaio em névoa salina

Corpo de prova	$P_{\text{máx}}$ (kN)	$P_{\text{mín}}$ (kN)	$P_{\text{méd}}$ (kN)	$P_{\text{amp}}$ (kN)
10	3,16	1,58	2,37	0,79
11	3,18	1,59	2,38	0,79
12	4,11	2,05	3,08	1,03
13	4,10	2,05	3,08	1,03
14	4,78	2,39	3,59	1,20
15	4,77	2,38	3,58	1,19

Fonte: Próprio autor

Sendo assim, tendo todos esses parâmetros referentes a tensões, cargas e dimensões foi possível realizar todos os ensaios em névoa, e a vida obtida para cada nível de tensão de

amplitude e de tensão de amplitude corrigida por Smith-Watson-Topper está apresentado na Tabela 15 abaixo.

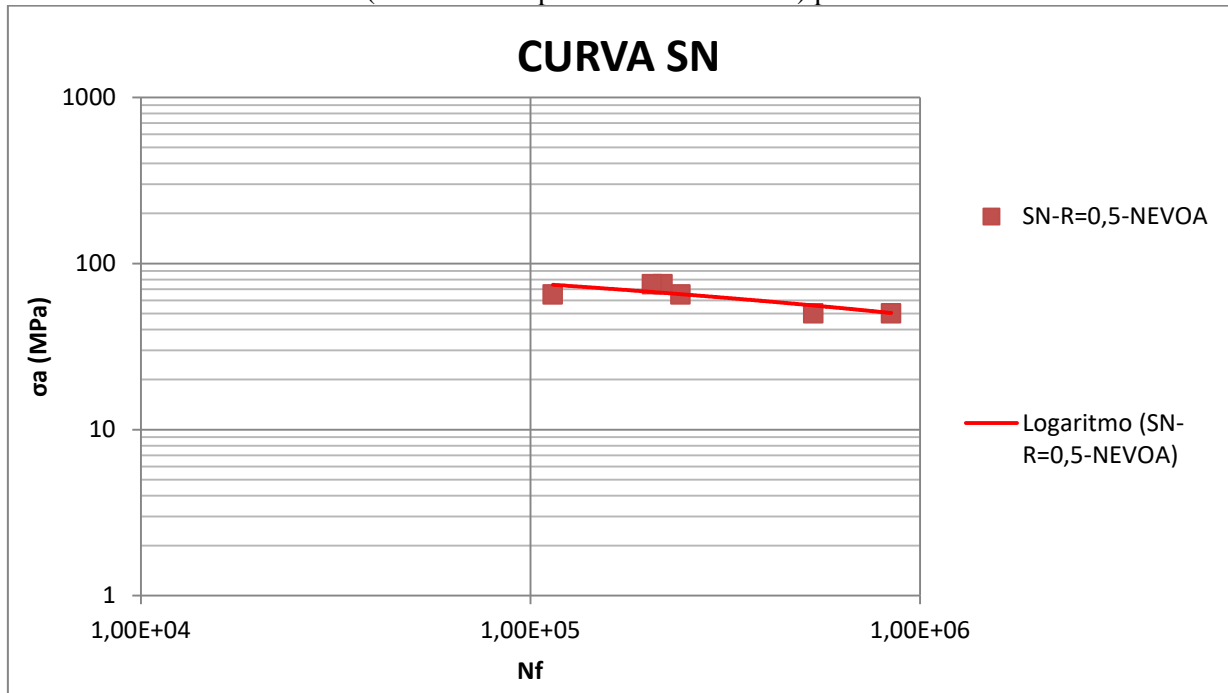
Tabela 15: Número de ciclos necessário para fratura de cada corpo de prova ensaiado em névoa salina

Corpo de prova	R	$\sigma_{amp}$ (MPa)	$\sigma_{ar} (\sigma_m=0)$ (MPa)	Nf
10	0,5	50	100	843522
11	0,5	50	100	532810
12	0,5	65	130	114234
13	0,5	65	130	243060
14	0,5	75	150	218679
15	0,5	75	150	205490

Fonte: Próprio autor.

Como no item 4.1, nesta seção os dados também foram plotados em forma gráfica (Gráfico 2 abaixo) e em conjunto com uma linha de tendência, visando assim facilitar a análise dos resultados obtidos.

Gráfico 2: Curva de Wohler (Tensão de amplitude x Vida ou S-N) para os ensaios em névoa salina



Fonte: Próprio autor

Desta forma, no Gráfico 2 acima os pontos avermelhados correspondem exatamente aos obtidos nos ensaios e a linha vermelha representa a linha de tendência destes.

Por fim, outro resultado aqui também apresentado é a equação da curva gerada pelas tensões de amplitude corrigidas por SWT versus a vida do material. Conhecendo a equação que relaciona tensão corrigida e vida

$$\sigma_{ar} = C * (2Nf)^m ,$$

e tendo diferentes valores de  $\sigma_{ar}$  (tensão corrigida) e de  $Nf$  (vida) obtidos nos ensaios, é possível a partir de um sistema de equações de duas variáveis obter os valores de  $C$  e  $m$ . Neste caso em especial obtivemos  $C = 3,674 * 10^{10}$  e  $m = -0,426$ , aonde  $\sigma_{ar}$  foi dado em Pascal (Pa) e o número de ciclos em ciclos. Assim, a equação da curva é dado por:

$$\sigma_{ar} = 3,674 * 10^{10} * (2Nf)^{-0,426} .$$



## 5. ANÁLISE GERAL

Como primeira análise, pode-se explicitar a replicabilidade dos ensaios. Segundo a norma da ASTM (2010), os percentuais de replicabilidade apresentados na Tabela 9 (seção 4.0) definem os resultados dos ensaios obtidos como resultados de "Pesquisa e desenvolvimento para corpos de prova e componentes". Fato este que se mostra de acordo com o propósito da pesquisa aqui apresentada.

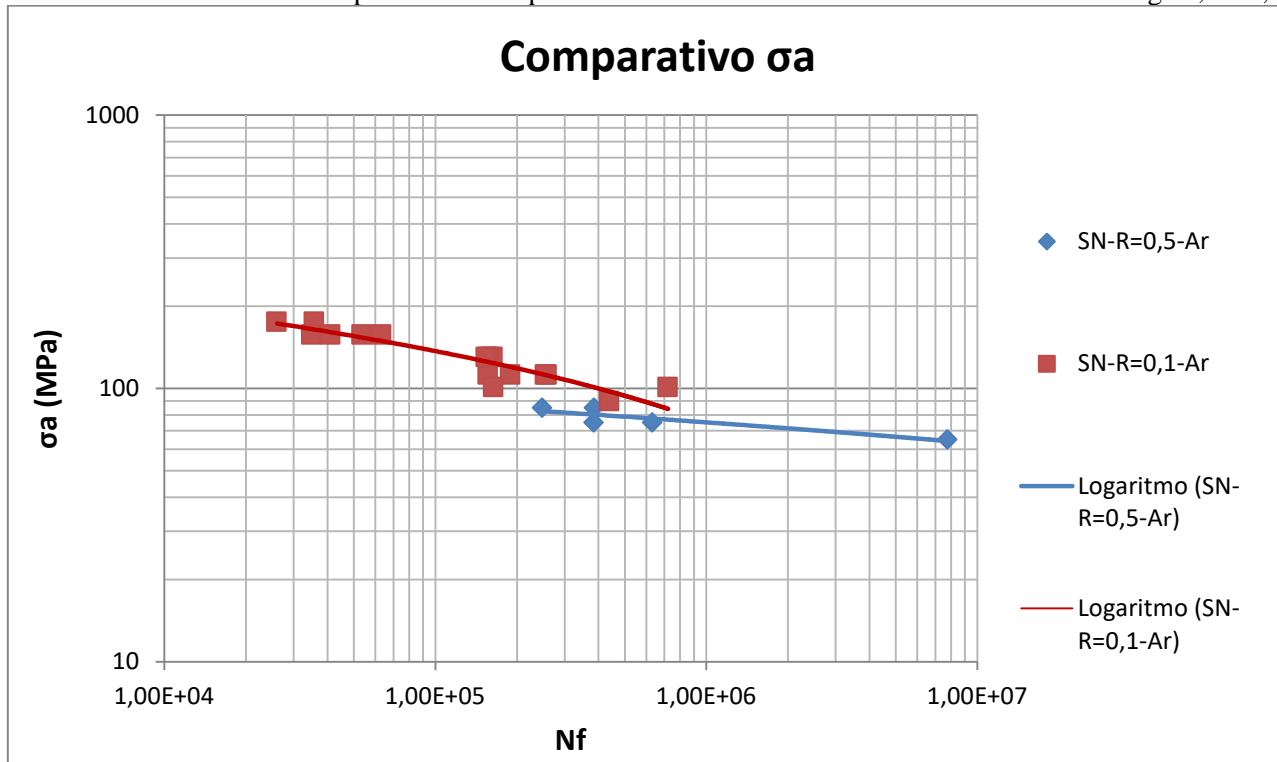
### 5.1 Análise Comparativa do Ensaio em Ar

Para as análises dos resultados obtidos em ar, neste relatório propõe-se uma comparação com resultados obtidos por Gamboni (2011). Na ocasião, este apresenta em seu trabalho resultados para a mesma liga AA2524-T3 em condições atmosféricas, entretanto com razão de carga  $R=0,1$ . Tal fato possibilita uma análise da influência da razão de carga na vida do material ou componente. Outra diferença processual, é que Gamboni em sua pesquisa utilizou uma frequência de onda de 40Hz, diferente da proposta neste trabalho, entretanto já se sabe por meio de literaturas que a influência da frequência de oscilação na vida de um material ensaiado em ar, é praticamente nula, por conta da rápida reação de formação da camada de óxido na superfície da trinca que isola o material sem que haja danos eletroquímicos significativos em ambientes pouco corrosivos, fato este que valida a análise comparativa dos ensaios aqui apresentados com os de Gamboni (2011).

O Gráfico 3 em escala log-log abaixo apresenta por meio da curva de Wohler os resultados de amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ) versus a vida do material obtidos por Gamboni (2011) no caso do  $R=0,1$  e os obtidos na pesquisa aqui apresentada comparativamente no caso de  $R=0,5$ .



Gráfico 3: Gráfico comparativo de amplitude de tensão de ensaios em ar com razões de carga 0,1 e 0,5



Fonte: Próprio autor

Por meio de uma análise comparativa, podemos notar que a vida em fadiga dos corpos de prova ensaiados por Gamboni (2011) foram menores do que os no trabalho aqui apresentado. A situação se deve ao fato de que apesar das tensões médias serem próximas, variando de 110MPa a 250MPa, a razão de carga adotada por Gamboni (2011) foi inferior à adotada neste trabalho. Por conta disso é possível afirmar que já que as tensões médias são próximas, a diferença de tensão máxima e mínima dos ensaios de Gamboni (2011) era menor, assim o valor de R foi menor, conferindo aos seus ensaios um caráter ainda mais trativo. Tal fato comprova a validade da equação 15 abaixo extraída de Dowling (2007).

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{2 \cdot \sigma_m}{1+R} \quad (\text{Equação 15}),$$

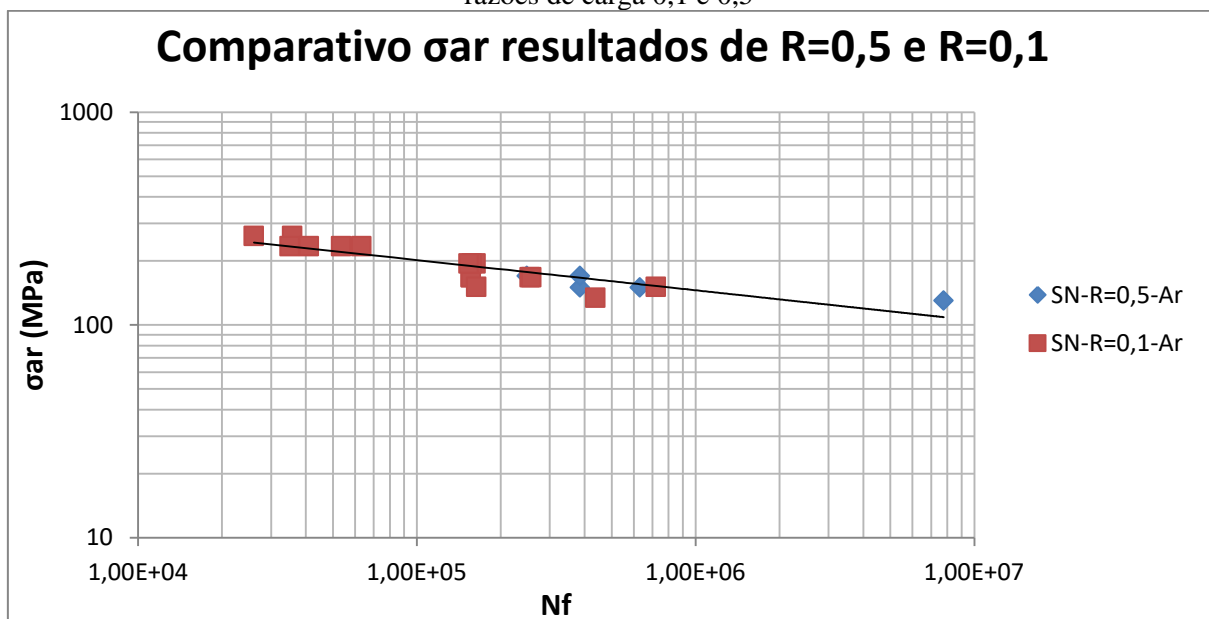
onde  $\sigma_{\text{máx}}$  é a tensão máxima,  $\sigma_m$  é a tensão média e R é a razão de tensão.

Sendo assim, o obtido em ensaio condiz com o esperado segundo embasamento teórico, pois como temos uma tensão média próxima em ambos os casos plotados no gráfico, quanto menor o valor de R, maior será o valor da tensão máxima. Desta forma, quanto maior

a força empregada no ensaio, maior será a chance de ocorrer a formação de planos de deslizamento provenientes da deformação plástica no grão mais desfavoravelmente orientado, assim, as discordâncias terão maiores possibilidades de se movimentarem e atravessarem o retículo plano a plano até que cheguem a superfície. Com isso, a probabilidade de que várias discordâncias atravessem planos de escorregamento paralelos e próximos e desloquem o cristal do seu lugar de origem é grande, fato que culmina na geração de uma trinca que concentra ainda mais a tensão levando o material a falha e justificando assim as diferenças nos resultados obtidos.

O Gráfico 4 em escala log-log abaixo por sua vez expõe as tensões corrigidas por Smith-Watson-Topper (SWT) obtidas neste relatório, em comparação com Gamboni (2011).

Gráfico 4: Gráfico comparativo de amplitude de tensão corrigida por SWT de ensaios em ar com razões de carga 0,1 e 0,5



Fonte: Próprio autor

Tecendo a análise comparativa entre os resultados, esperava-se que as curvas se sobrepusessem completamente devido ao fato de que quando as tensões de amplitude são corrigidas pela fórmula proposta por SWT, encontra-se uma tensão de amplitude equivalente a primeira, entretanto para um caso onde a tensão média é igual a zero, ou seja, em uma situação de carregamento completamente reverso. Desta forma, elimina-se o efeito da tensão média e da razão de carga e pode-se comparar se os ensaios seguiram uma mesma linha de

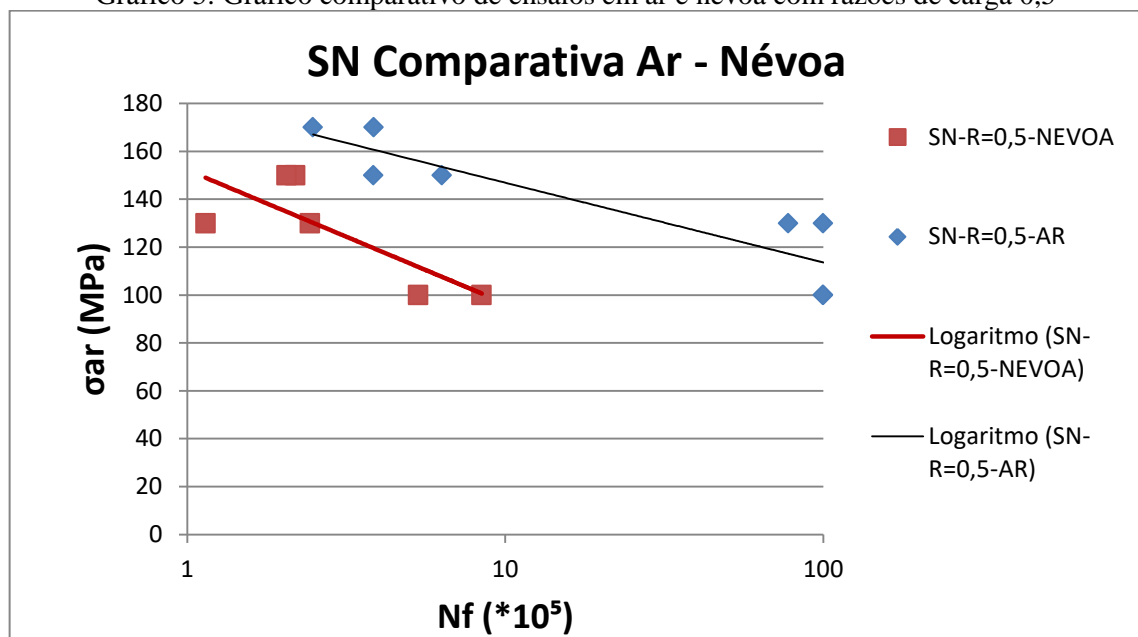
tendência. Neste relatório os resultados foram bem satisfatórios, de modo que se pode perceber que a linha de tendência se adequou de maneira precisa aos valores obtidos, comprovando que a correção de SWT é realmente válida. A pequena variação apresentada se deve aos erros e variações intrínsecas aos ensaios realizados, como por exemplo uma pequena variação na qualidade do acabamento superficial dos corpos de prova.

## 5.2 Análise Comparativa do Ensaio Névoa com Relação aos em Ar

Para análise dos resultados obtidos em névoa, propõe-se uma comparação com os dados extraídos em ar neste mesmo relatório. É válido destacar que para os ensaios em névoa se utilizou uma frequência de 5Hz, enquanto no ensaio em ar a frequência foi de 50Hz. A escolha se deu pois caso a frequência adotada no ensaio em névoa fosse tão alta como no ensaio em ar, não seria possível a névoa agir sobre a iniciação de trinca do material, de modo que o efeito desta sobre a vida seria desprezível. Já no caso dos ensaios em ar, a frequência adotada foi alta pois o ambiente atmosférico não apresenta interações significativa com a iniciação de trinca do material, de modo que se os ensaios fossem realizados a 5Hz em ar, os resultados em vida seriam praticamente o mesmo, salvo variações naturais.

Contudo, o Gráfico 5 em escala log-log abaixo apresenta a comparação mencionada das tensões corrigidas obtidas em cada ensaio. Neste caso se adotou as apenas as tensões corrigidas para a análise comparativa pois a correção por SWT não prevê o ambiente no qual os ensaios são realizados, logo, o efeito do ambiente pode ser claramente evidenciado.

Gráfico 5: Gráfico comparativo de ensaios em ar e névoa com razões de carga 0,5



Fonte: Próprio autor

Por meio de uma análise comparativa, podemos notar que a vida em fadiga dos corpos de prova ensaiados em névoa apresentou valores muito inferiores aos corpos de teste ensaiados em ar. A situação se justifica por três fatores. O primeiro deles é que o ambiente corrosivo acelerou a degradação do filme passivante, causando assim uma ruptura local desta camada. Tal ruptura gera pequenos concentradores de tensão de escala nanométrica devido a uma dissolução do metal para formação de uma nova camada. Estes concentradores de tensão gerados -denominados pites de corrosão - antecipam o processo de iniciação de trinca por aumentar a tensão local, causando assim a formação de planos de deslizamento e consequentemente fraturando o material.

O segundo fator que explica a vida reduzida desta liga de Al submetida a ensaios em névoa é o efeito da fragilização por hidrogênio e oxidação mais rápida das bandas de deslizamento, provocando o aparecimento prematuro de trincas.

Como já mencionado na revisão bibliográfica, a fragilização por hidrogênio é um fenômeno de corrosão sob tensão que ocorre em meios iônicos, sendo causada pela difusão do hidrogênio em sua forma iônica,  $H^+$ , para o interior das trincas em início no material, fato este que produz tensões que levam o material a uma fratura localizada e que dá origem a diversas outras trincas (RODRIGUES; MIRANDA, 1994).

O terceiro e último fator utilizado neste trabalho para explicar a menor vida da liga em ambiente salino é a corrosão eletroquímica que ocorre na liga AA2524-T3. Isso ocorre devido à criação de células galvânicas que surgem pela formação de minúsculas partículas compostas pelo elemento cobre ou pela formação de filmes depositados na superfície da liga como resultado de corrosão. Depois de iniciado um processo de corrosão, os íons de cobre, que anteriormente se encontravam na liga, formam uma cobertura no material, dando origem a um cátodo metálico. A redução dos íons de cobre e o aumento da eficiência da reação de redução de  $O_2$  e  $H^+$ , aceleram a taxa de corrosão, aumentando assim a quantidade de pites e outros concentradores de tensão, fazendo com que este falhe prematuramente (HOLLINGSWORTH; HUNSICKER, 1987).

## 6. CONCLUSÃO

Portanto, conclui-se que para que se possa estimar a vida de um material é necessário ter o conhecimento das cargas estáticas ao qual o mesmo será submetido, das intensidades das cargas dinâmicas aplicadas, do ciclo de aplicação das mesmas e do meio ao qual o componente/material estará sujeito a trabalhar. Neste relatório foi possível verificar de maneira teórica e prática que o ambiente de névoa salina seguindo os padrões aqui expostos pode reduzir a vida média de um corpo de prova em até 80%, fator este que se não levado em consideração durante o projeto pode trazer falhas inesperadas. Seguindo os preceitos de Smith-Watson-Topper (SWT), foi possível também obter a equação  $\sigma_{ar} = 3,674 * 10^{10} * (2Nf)^{-0,426}$ , que representa o número de ciclos ao qual um corpo de prova resiste em ambiente de névoa salina em função da tensão de fadiga aplicada, fato que possibilita a ampliação de aplicação da liga AA 2524-T3 mesmo em projetos onde os componentes feitos deste material estejam submetidos a tal névoa, uma vez que tendo uma provisão precisa da vida do componente, é possível reduzir o coeficiente de segurança aplicado, ter maior conhecimento do comportamento do material e evitar assim falhas catastróficas. Por fim, foi possível comparar os resultados de fadiga em ar apresentados no presente trabalho para  $R=0,5$ , com os expostos por Gamboni (2011) para  $R=0,1$ , concluindo que como Gamboni (2011) apresentou um fator de carga inferior e as tensões médias de sua avaliação eram muito próximas as apresentadas no presente trabalho, seus ensaios tiveram caráter mais trativo, justificando a menor vida apresentada. Entretanto pode-se validar a equação de Smith-Watson-Topper (SWT) e os procedimentos seguidos nos trabalhos comparados, uma vez que eliminando o fator de carga pela a correção da tensão “ $\sigma_{ar}$ ”, houve sobreposição das curvas de fadiga (para os ensaios em ar).

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E739-10**: Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (s-n) and strain-life ( $\epsilon$ -n) fatigue data. West Conshohocken, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E468-11**: Standard practice for presentation of constant amplitude fatigue test results for metallic materials. West Conshohocken, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1823-13**: Standard terminology relating to fatigue and fracture testing. West Conshohocken, 2013.
- BONAZZI, L.H.C. **Comportamento em fadiga da liga AL-LI AA2050**. 2013. 134p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- CALLISTER JUNIOR, W.D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**: uma abordagem integrada. 2.ed. Traduzido por Sergio M.S.Souares. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CALLISTER JUNIOR, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- DAVIS, J.R. **Aluminum and aluminum alloys**. Ohio: ASM International, 1993. (ASM Specialty Handbook).
- DAVIS, J.R. **Corrosion of aluminum and aluminum alloys**. Ohio: ASM International, 1999.
- DIETER, G.E. **Metalurgias mecânica**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.
- DOWLING, N.E. **Mechanical behavior of materials**: engineering methods for deformation, fracture and fatigue. 3<sup>th</sup> Lebanon: Pearson Prentice Hall, 2007.
- FOLEY, R.T. Localized corrosion of aluminium alloys-a review. **Corrosion**, Houston, v.42, n.5, p.277-288, May 1986.
- GAMBONI, O.C. **Estudo do efeito do ambiente no comportamento em fadiga de novas ligas de Al de grau aeronáutico**. 2001. 164p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- HOLLINGSWORTH, E.H.; HUNSICKER, N.Y. **Corrosion of aluminum and aluminum alloys**. 9<sup>th</sup>ed. Ohio: ASM International, 1987. (Metals Handbook, v.13).
- NISANCIOGLU, K. **Corrosion of aluminium alloys**. Proceedings of ICAA3, v.3, p.239-259, 1992.

RABBI, M.S. **Comportamento em fadiga de dois aços microligados utilizados na fabricação de discos de rodas automobilísticas.** 1998. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 1998.

REDD-HILL, R.E. **Princípios de metalurgia física.** 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabra Dois, 1982.

RODRIGUES, J.A.; MIRANDA, P.E.V. **Gases em metais e ligas** - fundamentos e aplicações em engenharia. Rio de Janeiro: Didática Científica, 1994.

SZLARSKA-SMIALOWSKA, Z. Pitting corrosion of aluminium. **Corrosion Science**, v.41,n.9 , p.1743-1767, 1999.

WEI, R.P.; LIAO, C.M.; GAO, M.A. Transmission electron microscopy study of constituent-particle-induced corrosion in 7075-T6 and 2024-T3 aluminum alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Wassendale, v.29, n.4, p.1153-1160, Apr. 1988.