



Projeto de iniciação científica

VIDA EM FADIGA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7175-T1

Relatório Final

**Bolsista: Maurício de Carvalho Silva
Orientador: Prof. Rodrigo Magnabosco**

31/10/2001

**Laboratório de Materiais
Departamento de Mecânica
Faculdade de Engenharia Industrial
Fundação de Ciências Aplicadas**

INTRODUÇÃO

O alumínio é um material de suma importância entre os metais vigentes. Possui características únicas, como baixa densidade aliada à alta resistência a corrosão. Quando formando ligas, apresenta excelente resistência mecânica e tenacidade. O alumínio é, nos dias atuais, um dos materiais de engenharia de uso mais crescente, utilizado em peças simples como em utensílios de cozinha e, até, em estruturas complexas de automóveis e aeronaves ^[1].

Uma pesquisa realizada pela revista *Fundição e Serviços* de Janeiro de 2001, com 139 fundições de materiais não ferrosos, onde a maioria tinha como o principal produto o alumínio, mostra um otimismo crescente dos empresários devido os bons índices de produção e faturamento alcançados no ano de 2000. Tal otimismo pode ser justificado pela aplicabilidade mais expressiva do alumínio na indústria aeronáutica que, apesar dos avanços tecnológicos de outros materiais como compósitos e as fibras de carbono, tem consolidado o alumínio como o principal material utilizado em estruturas de aviões. Outro fato é o grande crescimento na aplicação do alumínio pela indústria automobilística, sendo que atualmente as participações das ligas de alumínio em automóveis vão além de aplicações em partes específicas do motor, ganhando espaço, também, nas partes estruturais dos veículos.

A redução de peso num automóvel pode representar economia de combustível e a conseqüente diminuição dos níveis de poluentes que, atualmente, chega a ser a razão mais importante para a redução de peso. Para se ter uma idéia de economia alcançada, o modelo VW Lupo 3L TDI com 3 cilindros e motor Diesel 1.2, consome 3 litros de combustível para percorrer 100km^[2, 3].

Esta crescente aplicação das ligas de alumínio é capaz de justificar os objetivos do presente trabalho. Com ensaios de tração (para se determinar propriedades mecânicas do material) e, principalmente com os de fadiga (foco do trabalho), tornar-se-á possível a constatação que, através de tratamentos

térmicos de solubilização seguidos de extrusão a quente e envelhecimento natural (T1), a liga AA7175 pode ter, por exemplo, sua resistência a tração de aproximadamente 600 MPa e limite de resistência a fadiga de 159 MPa ^[4, 5].

OBJETIVO

O presente projeto de pesquisa procurará obter dados da liga de alumínio AA7175 permitindo, assim, prever a vida em fadiga de alto ciclo ($N_f > 10^4$ ciclos, ou quando não existam laços de histerese na curva tensão-deformação cíclica) por análise de tensões, analisando a influência das variáveis de ensaio controlado por amplitude de tensões. Além disso, pretende-se obter dados que possam ser utilizados em análises futuras de vida em fadiga por análise de deformações, viabilizando a parte II deste projeto que terá início em dezembro de 2001.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

HISTÓRICO DA FADIGA

Muitas das falhas de mecanismos acontecem como resultado da variação dos carregamentos em função do tempo e com valores de cargas abaixo dos carregamentos estáticos, ou seja, estes carregamentos normalmente estão abaixo do limite de escoamento do material. Com isto percebe-se que, para não tornar o projeto inseguro, deve-se projetar um mecanismo considerando as cargas dinâmicas e não só as estáticas, já que a fadiga é responsável por aproximadamente 90% das falhas em peças metálicas ^[7, 8].

Este fenômeno foi inicialmente noticiado por volta de 1800, quando eixos de locomotivas começaram a falhar com pouco tempo de uso. O material empregado era dúctil e mesmo assim, este apresentava uma superfície de fratura frágil e rápida, pois este processo de falha inicia-se com uma pequena trinca, proveniente de concentrações de tensões na superfície externa ou até mesmo defeitos internos, que irão se propagar, pois a superfície de fratura é perpendicular a direção da tensão aplicada [7, 8]. Em 1843, Rankine publicou o artigo “*On the Causes of Unexpected Breakage of Journals of Railway Axles*” onde se postulou que o material tinha cristalizado e tornado-se frágil devido às flutuações de tensões. Na verdade os eixos foram projetados levando-se em consideração apenas os esforços estáticos; porém, após a introdução dos mecanismos movidos a vapor, os carregamentos dinâmicos surgiram como um novo fenômeno. Estes eixos eram fixados nas rodas dos vagões e durante o movimento eram submetidos a uma flexão rotativa, na forma de reversão completa como visto na Figura 1 [8].

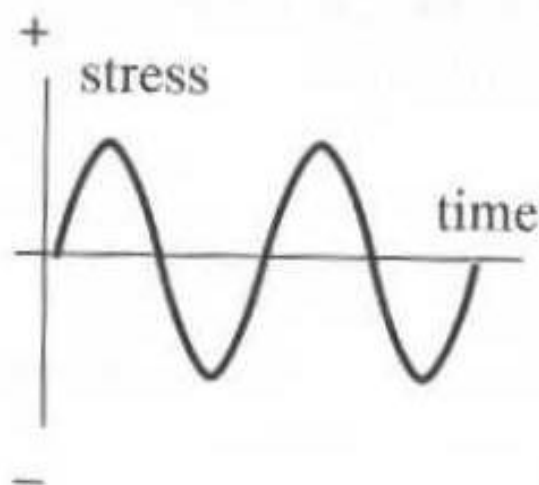
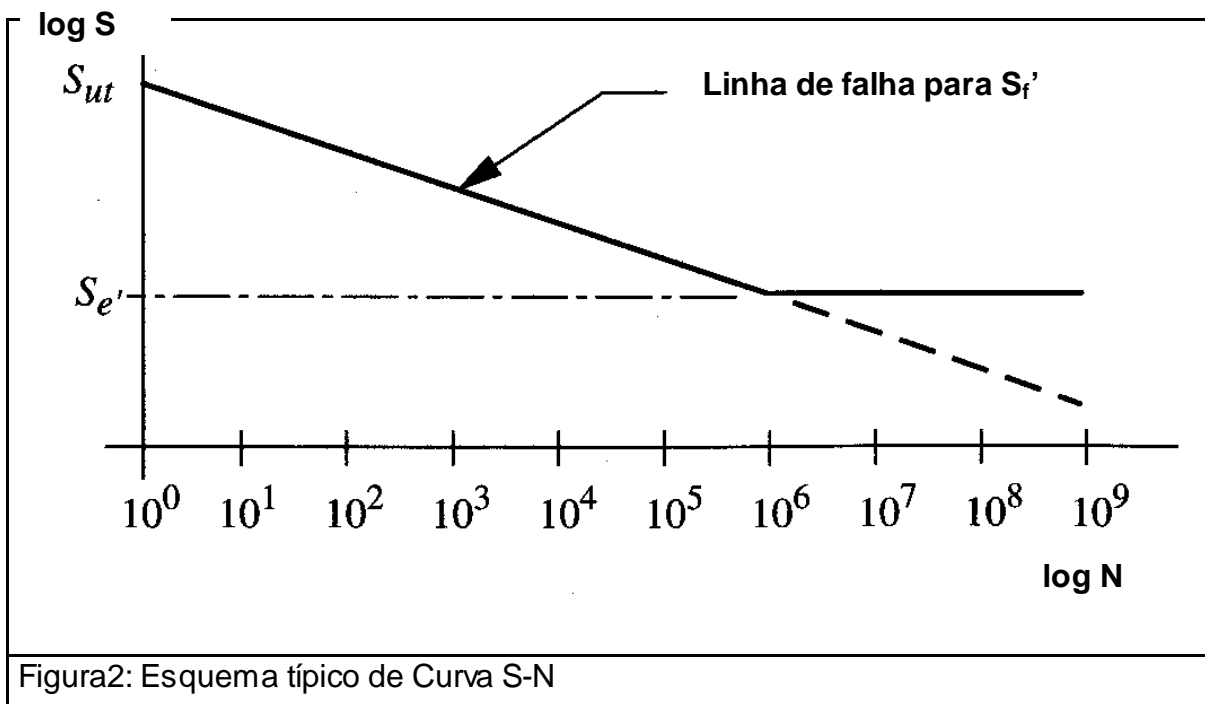


Figura1: Tensão x Tempo com reversão completa

Um engenheiro alemão, August Wöhler, fez a primeira investigação científica (que durou mais de 12 anos) do que é chamado hoje como “Falha por Fadiga”, submetendo os eixos a condições de carregamentos com reversão completa. Em 1860 ele publicou suas descobertas, identificando o número de ciclos de tensão em função da variação de tensão como os responsáveis pela falha e notificou a existência do limite de fadiga (σ_e) para aços, que representa um nível de tensão aplicada onde o material pode trabalhar por milhões de ciclos com tensões totalmente reversas sem caminhar para a fratura. A curva S-N ou de Wöhler tornou-se um padrão na caracterização dos comportamentos dos materiais e é usada até hoje, sendo representada na Figura 2^[8]:



Poncelet em 1839 foi o primeiro a utilizar o termo fadiga. O mecanismo de falha ainda não havia sido descoberto e a aparência frágil da superfície, mesmo de materiais dúcteis, permitiu especular-se que o material “cansou” e fragilizou a partir das oscilações dos carregamentos. Porém, um pouco mais tarde Wöhler mostrou, através de um ensaio de tração, que os eixos fraturados naquela ocasião ainda eram fortes e dúcteis. Mesmo assim, o termo fadiga permaneceu até os dias atuais quando se fala em cargas variáveis em função do tempo ^[8]. Pode-se ver na Tabela 1, os principais pesquisadores e colaboradores de falhas por fadiga.

Os custos anuais com falha por fadiga nos Estados Unidos, segundo Dowling ^[9], são altíssimos. Por exemplo, em 1982 estes custos chegaram a 100 bilhões de dólares, com danos em veículos, aviões, pontes, indústrias petrolíferas e outros. Estes custos também podem envolver vidas humanas, provocados pelos desastres aéreos, como por exemplo, os desastres sofridos com os aviões da British Comet a partir de 1954. Na segunda Guerra Mundial houve um desenvolvimento muito grande na utilização dos materiais e de lá para cá os pesquisadores são motivados a acharem cada vez mais respostas para as falhas de fadiga, visando a diminuição dos custos ^[8, 9].

Tabela 1: Cronologia dos pesquisadores sobre a falha de fadiga ^[8].

Ano	Pesquisador	Evento ou Realização
1829	Albert	Primeiro a documentar falhas por carregamentos repetidos
1839	Poncelet	Primeiro a usar o termo fadiga
1843	Rankine	Discute a teoria de cristalização (do material) da fadiga
1849	Stephenson	Discute a associação de falhas por fadiga nas estradas de ferro
1850	Braithwaite	Primeiro a utilizar o termo fadiga numa publicação Inglesa e discutir a teoria de cristalização
1864	Fairbairn	Relata a primeira experiência com carregamentos repetidos
1871	Wöhler	Publica resultados de 12 a 20 anos de investigação sobre falhas, apresentando o ensaio de flexão rotativa, o diagrama de curva S – N e a definição de limite de fadiga.
1871	Bauschinger	Desenvolve um extensômetro com 10^{-6} de precisão e estuda a tensão – deformação não elástica
1886	Bauschinger	Propôs um “limite elástico natural” cíclico onde a fadiga não se manifestaria
1903	Ewing/Humfrey	Descobrem linhas de escorregamento, trincas de fadiga e crescimento da trinca para falhar, invalidando a teoria da cristalização.
1910	Bairstow	Verificou a teoria do limite elástico natural de Bauschinger e o limite de fadiga de Wöhler
1910	Basquin	Desenvolveu a Lei exponencial de testes de fadiga (equação de Basquin)
1915	Smith/Wedgewood	Separou a tensão cíclica plástica da tensão total plástica
1921	Griffith	Desenvolveu o critério de fratura e relacionou com crescimento de trinca de fadiga
1927	Moore/Kommers	Quantificaram dados para a fadiga de alto ciclo para diversos materiais em “A Fadiga dos Materiais”
1930	Goodman/Soderberg	De forma independente publicam a influência da tensão média na fadiga
1937	Neuber	Publica a equação de Neuber para concentração de tensão em entalhes
1953	Peterson	Publica fatores de concentração de tensão de acordo com as geometrias
1955	Coffin/Manson	De forma independente publicam a Lei das deformações baseadas em fadiga de baixo ciclo (Lei de Coffin-Manson)
1961	Paris	Publica a Lei de Paris da mecânica da fratura para crescimento de trinca de fadiga

PRINCÍPIOS E NOMENCLATURA DA FADIGA

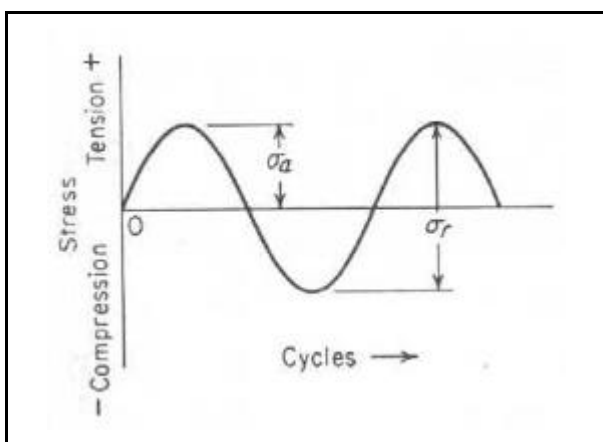
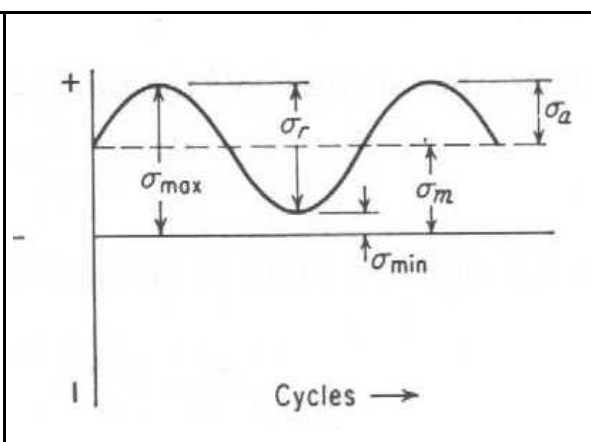
Fadiga é definida como uma falha de material que foi submetido a tensões cíclicas, sendo que o número de ciclos necessários para quebrar o componente depende da magnitude das tensões aplicadas e das condições em que são aplicadas. Por exemplo, se um arame é dobrado para frente e em seguida, cuidadosamente, for dobrado para trás, este arame não vai quebrar; porém, se for aplicado o mesmo carregamento repetidas vezes, então este arame por influência da modificação da situação de teste poderá romper. Partes como ganchos, peças de máquinas e aeronaves fraturam pois são submetidos a este tipo de carregamento ^[10].

Tensões localizadas causam mudanças estruturais nos produtos, provocando trincas ou fraturas após um certo número de ciclos. Uma vez iniciada uma trinca, haverá concentração de tensões ao redor da mesma, o que poderá gerar a fratura principalmente em materiais frágeis. As falhas por fadiga têm origem em imperfeições superficiais, inclusões e outros defeitos ^[10].

A tensão para provocar a falha por fadiga pode ser obtida pelo grau de variação da tensão ou pelo tipo de tensão. As tensões podem ser axiais, de cisalhamento, torcionais ou de flexão. A tensão em que um material falha por fadiga num dado número de ciclos é denominada resistência a fadiga e o limite de tensão no qual não ocorre falha devido as tensões cíclicas aplicadas chama-se limite de fadiga ^[10].

TENSÕES CÍCLICAS

As tensões alternadas aplicadas em componentes podem ser axiais, de flexão ou de torção. Geralmente, as configurações das tensões cíclicas são representadas pelas Figuras 3a e 3b ^[7, 11].

	
Figura 3a: Ciclo com reversão completa ^[11] .	Figura 3b: Ciclo sob influência da tensão média ^[11] .

A Figura 3a representa ciclos de tensão com reversão completa (tensão média igual a zero) que representa uma situação idealizada por R. R. Moore numa máquina para fadiga sob flexão rotativa e simula um eixo em operação sem sobrecargas. Para este tipo de ciclo, as tensões máximas e mínimas têm valores iguais, contudo se as fibras do material são tracionadas designa-se valor positivo para a tensão e, se forem comprimidas, recebem sinais negativos^[11].

A Figura 3b mostra uma relação assimétrica entre tensão máxima e tensão mínima, pois a tensão média é diferente de zero. Neste caso, percebe-se as tensões máximas e mínimas são positivas, porém ambas podem ser negativas ou a tensão mínima pode apresentar um valor nulo^[7, 11].

FORMULÁRIO

Com base nas figuras 3a e 3b, destaca-se não só as tensões máximas e mínimas e as tensões médias (ou residuais), porém ilustra-se as tensões alternadas e a faixa de tensões aplicadas. Então, destas figuras, pode-se extrair as seguintes relações^[7, 9, 11]:

- **Faixa de tensão (s_r ou D_s):** é a diferença entre a tensão máxima ($\sigma_{Max.}$) e tensão mínima ($\sigma_{Min.}$).
- **Tensão média (s_m):** é a média aritmética entre as tensões máximas e mínimas.
- **Tensão alternada (s_a):** é a metade da faixa de tensão (σ_r).
- **Razão de tensão (R):** é a razão da tensão mínima sobre a máxima.
- **Razão de amplitude (A):** é a razão entre a tensão alternada e tensão média.

CURVA S-N

O método básico para se apresentar os dados obtidos em ensaios de fadiga pode ser feito através da curva S-N, onde S representa o valor tensão que se contrapõe a N que é o número de ciclos necessários para a fratura, e é normalmente representado numa escala logarítmica, pois a variação deste parâmetro com relação ao nível de tensão aplicada varia rapidamente. O valor de tensão pode ser expresso por σ_a ou σ_{Max} , porém a relação S-N é determinada para uma condição específica, em função de σ_m , R ou A [11]. De acordo com as Figuras 3a e 3b, percebe-se que a curva S-N pode ser apresentada sob influência ou não da tensão média. Sabe-se que tensões médias de tração diminuem a vida em fadiga de um componente, conforme pode ser constatado na Figura 4. Para conduzir o ensaio de fadiga sob a influência da tensão média positiva, fixa-se uma taxa de tensão (R) e submete o material à diferentes tensões médias, o que significa maior tensão máxima numa mesma amplitude [9].

O número de ciclos de tensão que um metal pode suportar antes de se romper, aumenta com o decréscimo da tensão, como pode ser visto na Figura 5 [11].

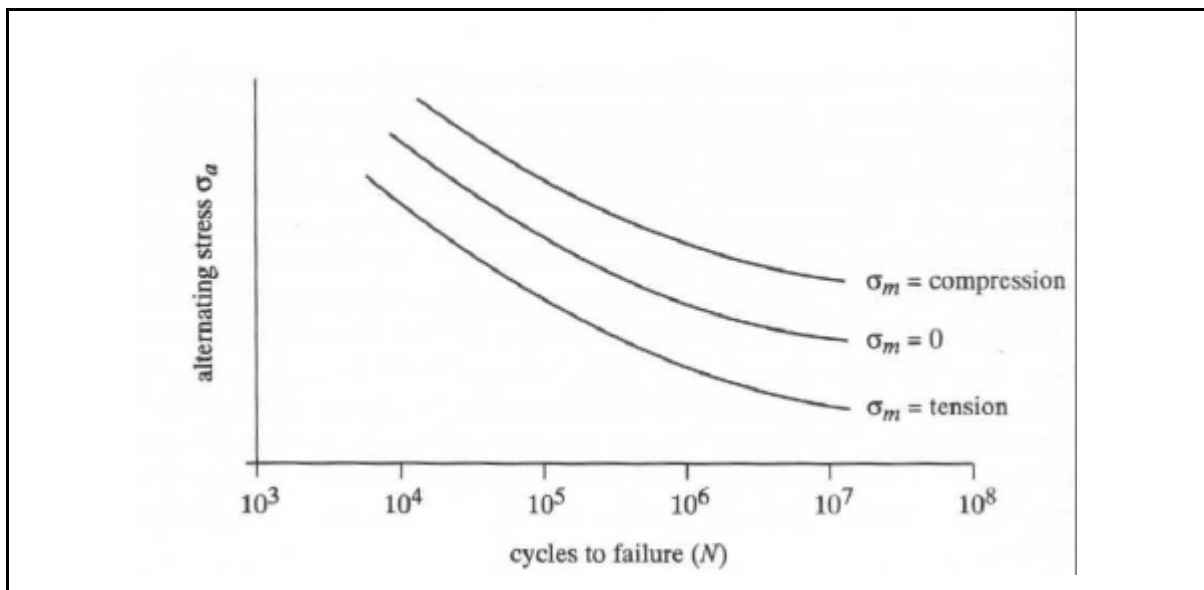


Figura 4: Efeito da tensão média na vida em fadiga

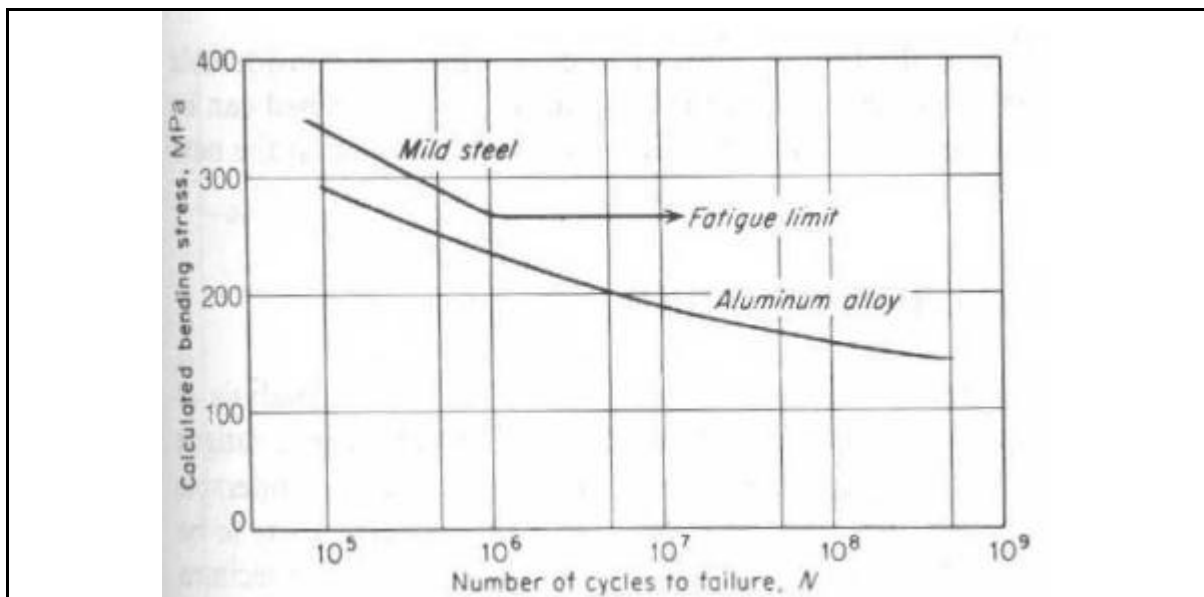


Figura 5: Curvas típicas de fadiga para metais ferrosos e não-ferrosos.

INÍCIO E PROPAGAÇÃO DA TRINCA

O processo de falhas por fadiga é caracterizado por três etapas [7, 11]:

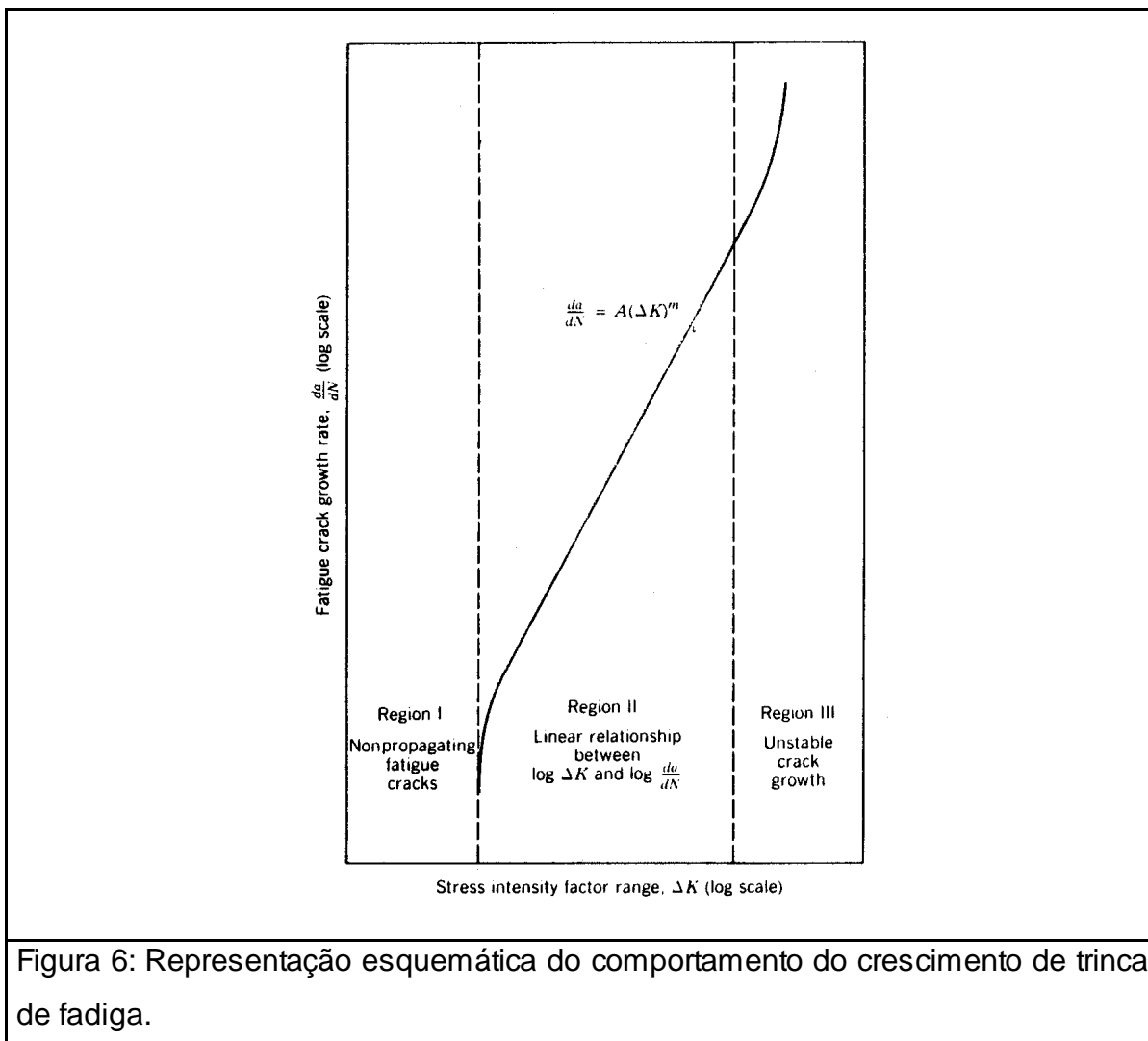
- 1) Iniciação da trinca: o mecanismo de formação de falha por fadiga em metais se inicia com a formação de bandas de escorregamento persistentes, causadas pela movimentação de discordâncias no reticulado cristalino em pequenas distâncias, levando à formação de intrusões e extrusões, ou seja, locais para nucleação de trincas, por acumularem grande deformação plástica;
- 2) Propagação da trinca: aumento da trinca a cada ciclo de tensão, até que a instabilidade determinada pela mecânica da fratura seja alcançada;
- 3) Falha final: ruptura do material devido ao rápido crescimento da trinca, uma vez que esta trinca atingiu o seu tamanho crítico.

Trincas associadas à fadiga geralmente se formam na superfície da peça, num ponto de concentração de tensão devido as descontinuidades existentes ou formam-se em intrusões e extrusões existentes no material, criadas pela movimentação de discordâncias durante o carregamento cíclico [7, 11].

Tendo-se a trinca iniciada, então esta propagar-se-á conforme a representação da Figura 6 [7], na qual pode-se perceber três regiões distintas que são descritas da seguinte maneira:

- **Região I:** A taxa de propagação da trinca neste estágio é muito pequena, se comparadas com as taxas da região II, e não se dá por fadiga [7, 11].
- **Região II:** A taxa de propagação da trinca por fadiga, nesta região, é função da tensão aplicada, tamanho da trinca e das variáveis do material [7]. Nesta região, a relação entre o intensificador de tensões e a taxa de crescimento da trinca é linear e é representada pela equação de Paris $(da/dN)=A(\Delta k)^m$, sendo que ΔK é a variação do fator intensificador de tensões desenvolvido pela mecânica da fratura, A e m são constantes particulares do material que dependem do meio, frequência e da taxa de tensão, resultando valores de m entre 1 e 6 [7].

- **Região III:** O crescimento da trinca nesta região se dá de maneira instável, obtendo-se a fratura rapidamente [7, 11].



PREVISÃO DA VIDA EM FADIGA PARA ANÁLISE DE TENSÕES

Baseado no número de ciclos de tensão ou deformação que o material trabalha, pode-se dividir a fadiga em duas situações: fadiga de alto ciclo (trabalha com baixas cargas e possui tempo longo para a falha) ou fadiga de baixo ciclo (trabalha com altas cargas e possui tempo curto para a falha). Este trabalho adota como linha divisória, para ter-se conhecimento de tempo curto ou longo, como 10^3 ciclos [8].

MODELOS DE FALHAS POR FADIGA

Existem 2 modelos de falhas por fadiga e cada uma tem seu propósito: vida sob tensão (S – N) e vida sob deformação ($\epsilon - N$) [8]. Neste trabalho, será discutido o modelo de estudo de falhas por fadiga que considera a vida sob tensão.

VIDA SOB TENSÃO

Este é o mais antigo dos 2 modelos e o mais usado para fadiga de alto ciclo ($>10^3$ ciclos), pois gera imprecisões se for usado para fadiga de baixo ciclo. Este modelo é baseado na tensão e tenta determinar a resistência a fadiga ou o limite de fadiga do material que tem o ciclo de tensões mantido abaixo de um nível que provocaria a falha. Então, o componente é projetado baseado na resistência a fadiga do material ou o limite de fadiga, junto com a consideração de um fator de segurança, mantendo-se assim uma baixa tensão nos locais mais solicitados, com o intuito de que a trinca nunca comece, pois presume-se que o material estará trabalhando no regime elástico [8].

Com base na Figura 2 que representa a curva S-N numa escala log-log e sem a influência da tensão média, a representação matemática desta curva, para o trecho reto, é $\sigma_a = A \cdot N_f^B$, onde $A = 2^b \cdot \sigma_f'$ e $B = b$. Então, uma outra maneira de representar a equação é como Basquin a representou: $\sigma_a = \sigma_f' \cdot (2 \cdot N_f)^b$, onde σ_f' é o coeficiente de resistência à fadiga do material e b é o expoente de Basquin, de acordo com o material [9].

Utilizando o trabalho de Basquin, Morrow adaptou a equação considerando a influência da tensão média, gerando a equação de Basquin-Morrow, dada por $\sigma_a = (\sigma_f' - \sigma_m) \cdot (2 \cdot N_f)^b$. Desta equação pode-se prever a vida em fadiga de um material metálico, conhecendo-se as tensões aplicadas e os parâmetros do material (b e σ_f').

Valores típicos de expoente de Basquin (b) situam-se entre -0.05 e -0.12 , e o coeficiente de resistência (σ_f') é em muitos casos numericamente igual a tensão real de ruptura observada em ensaios monotônicos de tração. Todavia, para ligas de titânio e de alumínio de alta resistência, nem sempre o coeficiente de resistência pode ser igualado à tensão real de ruptura observada nestes materiais, e os valores de expoente de Basquin podem atingir até -0.339 , como mostra a Tabela 2 ^[15].

Tabela 2: Propriedades mecânicas e parâmetros de fadiga de alguns materiais metálicos ^[15].

Material	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento total em 50mm (%)	S_f' (MPa)	b
Aço ASTM A36 laminado à quente	224	23	780	-0.110
Alumínio AA7075 T7351, em placa	382	8.4	989	-0.140
Alumínio AA2024 T3, em placa	378	17.3	1044	-0.247
			a	a
Liga de Ti – 0.4% Mn, em barra	303	42	3148	-0.114
			4986	-0.339

PARÂMETROS QUE AFETAM A VIDA EM FADIGA

O comportamento dos materiais de engenharia quanto à fadiga depende de uma série de fatores que afetam consideravelmente a vida em fadiga dos componentes. Estes fatores podem ser tensões residuais, variáveis metalúrgicas, efeitos superficiais, geometria e o meio envolvido ^[7].

TENSÃO RESIDUAL (OU TENSÃO MÉDIA)

O ato de deformar ou tratar termicamente um componente é capaz de criar deformações localizadas, acima do limite de escoamento do material, formando tensões residuais [8].

Um bom projeto requer que o engenheiro diminua, o máximo possível, as tensões residuais de tração, para não se criar efeitos negativos no componente. O ideal é que se criassem efeitos positivos. Para cada caso particular deve haver uma quantidade de testes (destrutivos) que caracterizem o componente quanto a tensão residual aplicada. Se os testes não forem executados, estima-se um fator de segurança considerando que as tensões reais serão maiores do que aquelas calculadas analiticamente [8].

Sendo a falha por fadiga um fenômeno que ocorre sob tensões de tração, pode-se perceber os benefícios e os malefícios que as tensões residuais podem provocar. Exemplo disto encontra-se na figura 4 [8], onde valores positivos de σ_m (tensão residual de tração) diminuem a vida do material sob fadiga numa dada amplitude σ_a de tensões.

Percebe-se que se houver uma tensão média de compressão, este componente terá maior vida em fadiga se comparado ao que possuir tensão média de tração.

TRATAMENTOS MECÂNICOS SUPERFICIAIS

Dentre os processos de tratamentos superficiais, citar-se-á dois processos que provocam tensões residuais compressivas, já que são métodos para aumentar o desempenho em fadiga de um componente [7, 8, 11]:

- **Shot peening:** Consiste na deformação plástica de uma superfície, por meio de esferas pequenas com diâmetros entre 0.1 a 1mm que são lançadas em alta velocidade de encontro a superfície a ser tratada. O

resultado da deformação, com profundidade entre um quarto e metade do diâmetro da esfera, induz tensão compressiva, o que aumentará a vida em fadiga do componente [7, 8].

- **Cold forming:** Aplicação particular em raios e chanfros contidos em eixos, onde através de rolos provoca-se a deformação plástica da superfície de revolução do componente, resultando uma tensão compressiva na superfície que protegerá a mesma dos carregamentos de flexão rotativa ou torção reversa [8].

CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

A presença de concentradores de tensões no material como entalhes, furos, roscas, pequenos raios de arredondamento, rugosidade da superfície, inclusões e superaquecimento localizado, diminuem consideravelmente a vida em fadiga [7, 11], pois os valores de tensões encontradas nos locais de concentração de tensões são maiores que a tensão nominal calculada. Então, como fator de concentração de tensão teórico, tem-se a razão entre a tensão máxima e a tensão nominal [11].

EFEITOS DO MEIO ENVOLVIDO

- **Temperatura** Quanto maior a temperatura, menor será a resistência do material. Sendo assim, também será menor a resistência a fadiga e o limite de fadiga [10].
- **Corrosão Fadiga** É um processo combinado de ações repetidas de tensões juntamente com a corrosão que usualmente é o agente responsável pela iniciação da trinca. Os métodos para se prever a vida de um equipamento nestas condições ainda não estão bem definidos, principalmente numa região de encontro de fenômenos como corrosão

sob tensão e presença de hidrogênio, que podem aumentar a taxa de propagação da trinca por fadiga ^[12, 13]. A corrosão induz um defeito ou produz um ponto que dará origem a uma trinca de fadiga. Porém, o início da corrosão propriamente dita se dá após o desenvolvimento de uma trinca de fadiga ^[14]. As variáveis deste processo (corrosão - fadiga) estão representadas por número de ciclos de fadiga (alto ou baixo ciclo), frequência, tensões principais aplicadas (amplitude de tensão), meio corrosivo, composição da liga (maior resistência à corrosão para ligas contendo cromo), microestrutura, limite de escoamento, densidade e espessura ^[12, 13,14]. A trinca de fadiga, com raras exceções se iniciará na superfície da peça. Então, diz-se que as condições da superfície são sensíveis, por exemplo, a tensões térmicas (resultante da rápida troca de temperatura), corrosão (antecipa o aparecimento de uma trinca) e às ondas de tensão, sendo que, se não houver o meio corrosivo teremos apenas a fadiga convencional ^[12,13]. Os efeitos mais significativos de corrosão na fadiga são observados numa frequência abaixo de 5Hz e usualmente consistem na aceleração do dano ^[14]. As trincas provocadas por corrosão fadiga podem ser reduzidas ou eliminadas pela redução dos ciclos de tensão, diminuindo o valor das tensões e/ou removendo o agente corrosivo. Adicionalmente podem ser adotadas características geométricas e dimensionais mais favoráveis, ou utilizar materiais mais resistentes ^[13,14].

DESIGNAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

As ligas de alumínio, segundo a *Aluminum Association* (AA), são divididas nas nove classes a seguir ^[1]:

1xxx: Série do alumínio puro (99,9%) ou comercial. Destacado pela resistência a corrosão, altas condutividades térmica e elétrica. Porém, apresenta baixa resistência mecânica.

2xxx: O cobre é o principal elemento de liga. Se receberem tratamentos tais como solubilização e envelhecimento, ter-se-á grandes aplicações na indústria aeronáutica, devido a alta resistência mecânica.

3xxx: O manganês é o principal elemento de liga. Não são ligas tratáveis termicamente, tendo como principal aplicação os produtos estampados.

4xxx: O silício é o principal elemento de liga. Apresenta baixo ponto de fusão e impossibilidade de tratamento térmico. São utilizados também como material de adição para solda.

5xxx: O magnésio é o principal elemento de liga. Sua aplicação é similar a da série 3xxx.

6xxx: Ligas de Al-Mg-Si, tendo como resultado a fase Mg_2Si o que tornará possível o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento. Não são tão resistentes quanto as classes 2xxx e 7xxx, porém são utilizadas na fabricação de bicicletas, pois podem ser soldadas.

7xxx: Ligas de Al-Zn. Dos tratamentos térmicos, resultam os mais altos índices de resistência mecânica e tenacidade. Ampla aplicação no setor aeronáutico.

8xxx: O principal elemento de liga é o lítio. São tratáveis termicamente e apresentam alta resistência mecânica específica.

9xxx: Outras ligas que não foram especificadas anteriormente.

DESIGNAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO

Utilizado tanto para produtos trabalhados mecanicamente como para fundidos, o sistema de designações de tratamentos é baseado na seqüência de tratamentos térmicos e/ou mecânicos aplicados ao material. As condições de realização do tratamento (como tempo e temperatura), podem até mudar de uma liga para outra, porém o procedimento será o mesmo.

As designações dos tratamentos térmicos são:

F Como fabricadas aplicados para os produtos formados em processos nos quais não existem controles especiais para ciclos térmicos ou encruamento. Para estes produtos, não são especificados limites para as propriedades mecânicas ^[1, 5].

O Designa recozimento O recozimento é aplicado a ligas trabalhadas, com o intuito de obter-se a mínima resistência mecânica. Em ligas fundidas, o recozimento é aplicado com o intuito de aumentar a ductilidade e obter estabilidade dimensional. Se a designação do recozimento for seguido de algum dígito, indicará algum tratamento especial^[1, 5].

W Solubilização seguida de estabilização, ou envelhecimento natural: Este tratamento só é aplicado para ligas que sofrem envelhecimento natural após a solubilização. Esta designação é específica somente se o período de envelhecimento natural for especificado. Por exemplo, W 1/2h^[1, 5].

H Designa encruamento Aplicados a produtos que tem sua resistência mecânica aumentada pelo encruamento e que, posteriormente, podem ou não sofrer tratamentos térmicos. Tais tratamentos, poderiam até provocar uma redução nas propriedades mecânicas, como por exemplo o recozimento. Veja a subdivisão deste tratamento^[1, 5]:

- **H1: Apenas deformado a frio (Encruado)** Aplicados em produtos que são encruados para obter resistência, sem que haja a necessidade de um tratamento térmico suplementar. O dígito seguinte a H1 representa o grau de encruamento.
- **H2: Encruado e parcialmente recozido** São pertinentes a produtos que receberam encruamento maior do que o necessário e, então, reduz-se a resistência até o nível desejado, através do recozimento. O dígito seguinte a H2 indica o grau de encruamento remanescente do recozimento.

- **H3: Encruado e estabilizado** Aplicados em produtos em que são encruados e cujas propriedades mecânicas são estabilizadas a baixas temperaturas de tratamentos térmicos, visando o aumento da ductilidade. O dígito seguinte a H3 indica o grau de encruamento remanescente da estabilização.

T: Tratamento térmico que produza têmperas estáveis, para obtenção de propriedades mecânicas diferentes das encontradas em F, O, W e H. Esta designação vem sempre seguida de um ou dois dígitos (de 1 a 10), onde cada número representa uma seqüência específica de tratamentos, conforme segue a descrição^[1]:

- **T1: Resfriado a partir de uma temperatura elevada de conformação e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável.** Aplicados em produtos que não são encruados após o resfriamento ou em que o efeito do encruamento é desprezível.
- **T2: Resfriado a partir de uma temperatura elevada de conformação, encruada e envelhecida naturalmente até uma condição substancialmente estável** Aplicados em produtos que são encruados, após o resfriamento, para aumentar a resistência ou em que o efeito do encruamento é significativo.
- **T3: Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente para uma condição substancialmente estável** Aplicados em produtos que são encruados, após a solubilização, para aumentar a resistência ou em que o efeito do encruamento é significativo.
- **T4: Solubilizado e envelhecido naturalmente para uma condição substancialmente estável** Aplicados em produtos que não são encruados, após o resfriamento da condição de alta temperatura, ou em que o efeito do encruamento não é significativo.
- **T5: Resfriado a partir de uma temperatura elevada de conformação e envelhecido artificialmente** Aplicados em produtos que não são

encruados, após o resfriamento da condição de alta temperatura, ou em que o efeito do encruamento não é significativo.

- **T6: Solubilizado e envelhecido artificialmente** Aplicados em produtos que não são encruados, após a solubilização, ou em que o efeito do encruamento não é significativo.
- **T7: Solubilizado e estabilizado** Aplicados em produtos que são estabilizados após a solubilização, obtendo grande resistência e suprimindo alguma característica de controle especial.
- **T8: Solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente** Aplicados em produtos que são encruados, para obter resistência ou em que o efeito do encruamento é significativo.
- **T9: Solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado** Aplicados em produtos em que o encruamento é utilizado para elevar a resistência após o envelhecimento.
- **T10: Resfriado a partir de uma temperatura elevada de conformação, encruado e envelhecido artificialmente** Aplicados em produtos que são encruados, para obter resistência ou em que o efeito do encruamento é significativo.

Se, para as designações acima, acrescentam-se dígitos a direita do último dígito, há indicação de um controle especial de uma das fases de seqüência do processo.

De acordo com as explicações e os motivos citados anteriormente, tem-se como objetivo, neste item, comparar as ligas de alumínio AA7075 e AA7175, sendo que na Tabela 4 estão as propriedades mecânicas e na Tabela 5 as composições químicas dos materiais em questão.

Tabela 4: Comparação das propriedades mecânicas de ligas de alumínio semelhantes ^[5, 9].

	Liga AA7075 – T6	Liga AA7175 – T6
Limite de Resistência [MPa]	572	593
Limite de Escoamento [MPa]	503	524
Alongamento em 50mm [%]	11	11
Dureza [HB] *	150	150
Módulo de Elasticidade [GPa]	71	72
Densidade [g/cm ³]	2.8	2.8
Limite de Fadiga [MPa]	159	159
Coeficiente de Poisson	0.33	0.33
Coeficiente de Resistência à fadiga [MPa]**	1466	-----
Expoente de Basquin**	-0.143	-----

* Dureza obtida com carga de 500kg, esfera de diâmetro 10mm e por tempo de 30 segundos.

** Os valores do coeficiente de resistência à fadiga e o expoente de Basquin para a liga de alumínio AA7175 faz parte do objetivo deste trabalho e serão apresentados no item procedimentos experimentais. No entanto, vale lembrar que este trabalho está estudando a liga de alumínio AA7175-T1.

Tabela 5 : Comparação das composições químicas de ligas de alumínio semelhantes^[5].

Composição Química Especificada (%Peso)		Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Si	Fe	Ti
Liga AA7075	Min.	5.1	2.1	1.2	0.18	0.30 máx	0.40 máx	0.50 máx	0.20 máx
	Máx.	6.1	2.9	2.0	0.28				
Liga AA7175	Min.	5.1	2.1	1.2	0.18	0.10 máx	0.15 máx	0.20 máx	0.10 máx
	Máx.	6.1	2.9	2.0	0.28				

ENSAIOS MECÂNICOS

Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente, em um corpo de prova normalizado, até a ruptura. É um ensaio amplamente utilizado nas indústrias de componentes mecânicos, por fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais, tais como Limite de Resistência, Limite de Escoamento, Módulo de Elasticidade (E), Alongamento e Estricção. Estes dois últimos parâmetros definem a ductilidade do material. Outro fator que justifica a importância do ensaio de tração é utilizar o mesmo para especificação e controle de matéria prima, já que os resultados deste ensaio são influenciados por parâmetros como temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão, porcentagens de impurezas, e tratamentos térmicos ^[4].

Ensaio de Fadiga

Ensaio de fadiga (importante para se prever a vida que terá um componente) consiste na aplicação de cargas cíclicas em corpo de prova normalizado, dependendo do tipo de ensaio de fadiga a ser aplicado. As normas que relacionam a fadiga são a ASTM E466 e E468, entre outras. Os testes de fadiga são conduzidos por um longo período de tempo, fato pelo qual não se aplica ao controle de qualidade ou inspeção de componentes; porém, são muito utilizados na indústria automobilística e aeronáutica, existindo ensaios em corpos de prova, pequenos componentes e até mesmo em estruturas completas, como asas e longarinas, já que existem diversos tipos de máquinas para testes de fadiga. O ensaio de fadiga é capaz de fornecer dados quantitativos relativos às características de um material ou componente de suportar, por longos períodos sem romper, cargas repetitivas e/ou cíclicas. Os resultados principais do ensaio de fadiga são a determinação do Limite de Resistência a Fadiga, Vida em Fadiga (Nf) em função da sollicitação cíclica imposta e os parâmetros de Basquin-Morrow ^[4, 7, 10].

Para obter-se os resultados mencionados, é necessário seguir um procedimento para o teste. Primeiramente, deve-se escolher o tipo de máquina: para tensão axial, para tensão de flexão, para tensão torcional ou de cisalhamento e até mesmo uma máquina universal que mescla as características das máquinas anteriores. Após isto, define-se o corpo de prova seguindo a norma competente. Aplica-se valores altos de tensões, no qual obter-se-á falhas rápidas e depois diminui-se gradualmente as tensões de teste, o que aumentará o número de ciclos para falhar até chegar ao limite de fadiga, onde não ocorrerá mais a falha. Um outro procedimento comum, desenvolvido por Wöhler, é o teste de flexão rotativa de uma barra ^[10].

MATERIAIS E MÉTODOS

Corpos de prova da liga de alumínio AA7175-T1 foram submetidos a ensaios de tração com o intuito de se determinar a rigidez, a resistência mecânica (limite de escoamento, limite de resistência e tensão real de ruptura) e ductilidade da liga AA7175 em estudo. Conduziu-se também ensaios de fadiga variando as cargas máxima e mínima para obtenção de ensaios com diferentes valores de tensão média e amplitude de tensões. Estes ensaios foram divididos em duas fases: na primeira fase ensaiou-se 33 corpos de prova com tensões médias variando de 185 a 260 MPa, amplitude de tensões de 89 a 259 MPa, tensão máxima de 348 a 519 MPa e tensão mínima de 0 (zero) a 165 MPa e foram nomeados de F1 até F33; na segunda fase, refez-se os ensaios F10, F13, F28 e F31, com seis amostras para cada situação que foram nomeadas de A a F, por exemplo, ensaio F13C. Estes ensaios foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios MTS, servo-controlada e com capacidade de carga 250 kN, representada pela Figura 7.

Análise química foi realizada com intuito de caracterização do material em estudo.



Figura 7: máquina universal de ensaios MTS (cortesia do LabMat da FEI)

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios químicos e tração podem ser visualizados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente, e caracterizam a autenticidade do material em estudo. Na Tabela 8, pode-se visualizar os resultados do ensaio de fadiga, os quais estarão sendo discutidos a seguir.

Tabela 6 : Composição química da liga AA7175 estudada.

Elemento	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Si	Al
(%massa)	5.13	2.32	1.40	0.18	0.02	0.09	balanço

Tabela 7: Propriedades Mecânicas da liga AA7175 estudada.

Propriedades Mecânicas	Liga AA7175 – T1
Limite de Resistência [MPa]	645
Limite de Escoamento [MPa]	612
Alongamento em 50mm [%]	11
Módulo de Elasticidade [GPa]	73

Tensão Real de Ruptura [MPa]	749
------------------------------	-----

Tabela 8: Parâmetros de Fadiga da liga AA7175 estudada.

Parâmetros de Fadiga	Liga AA7175 – T1
Coeficiente de Resistência à fadiga [MPa]	7223
Expoente de Basquin	-0.335

Os resultados do ensaio de fadiga apresentados na Figura 8 foram plotados numa escala logarítmica, e tem em seus eixos σ_a (amplitude de tensões) x Nf (número de ciclos para a fratura), representando ensaios para o mesmo valor de tensão média ($\sigma_m=260$ MPa), com o objetivo de obter o valor do expoente de Basquin e o coeficiente de resistência à fadiga, caracterizando o material quanto à vida sob fadiga de alto ciclo.

Para isto, fez-se a extrapolação da curva para um Nf igual a 0,5 [9], fazendo com que a expressão $\sigma_a=(\sigma_f' - \sigma_m).(2N_f)^b$, tivesse o termo relacionado a Nf eliminado, ficando $\sigma_a=(\sigma_f' - \sigma_m)$, e no caso de valores de tensão média igual a zero, o valor de σ_f' é igual a σ_a para Nf =0,5. Neste trabalho, o valor da tensão média é 260 MPa e sendo assim, da Figura 8 obteve-se a expressão $\sigma_a=(7223 - \sigma_m).(2N_f)^{-0.335}$. Os resultados que representam diferentes valores de tensão média podem ser vistos na Figura 9.

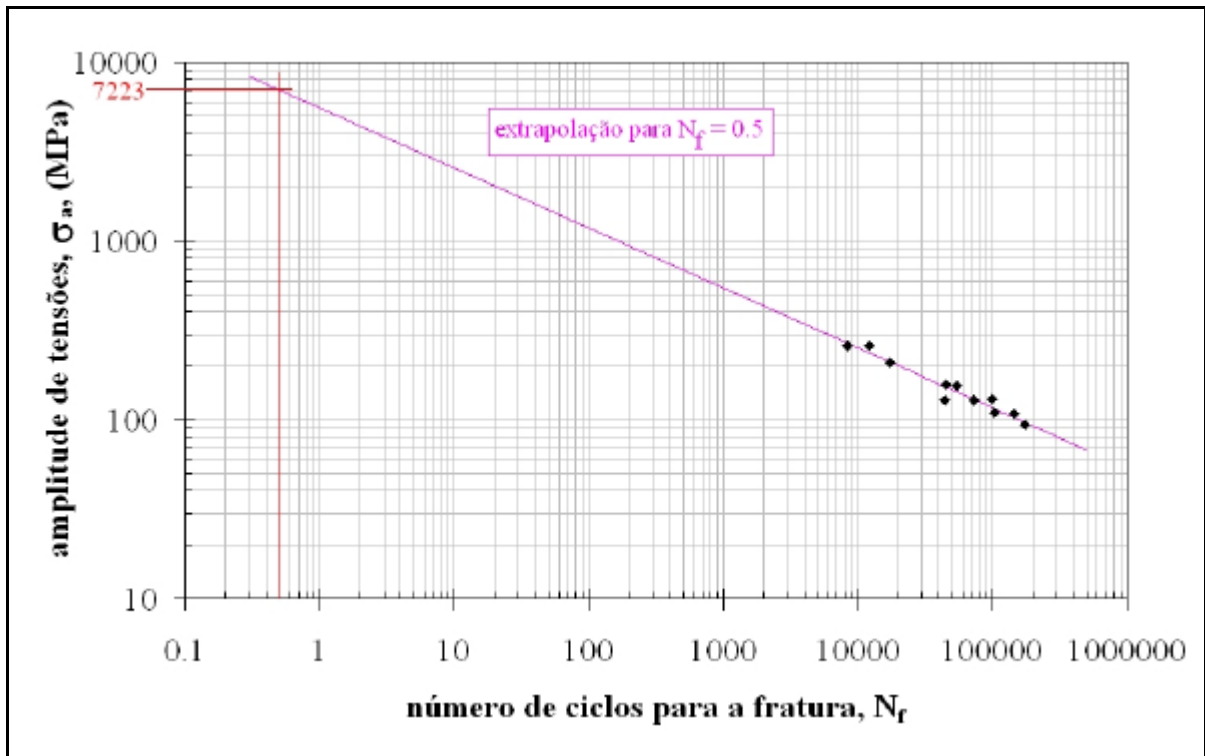


Figura 8: Relação entre a amplitude de tensões e o número de ciclos até a fratura da liga AA7175 em ensaios cíclicos onde a tensão média aplicada no ciclo manteve-se em 260 MPa.

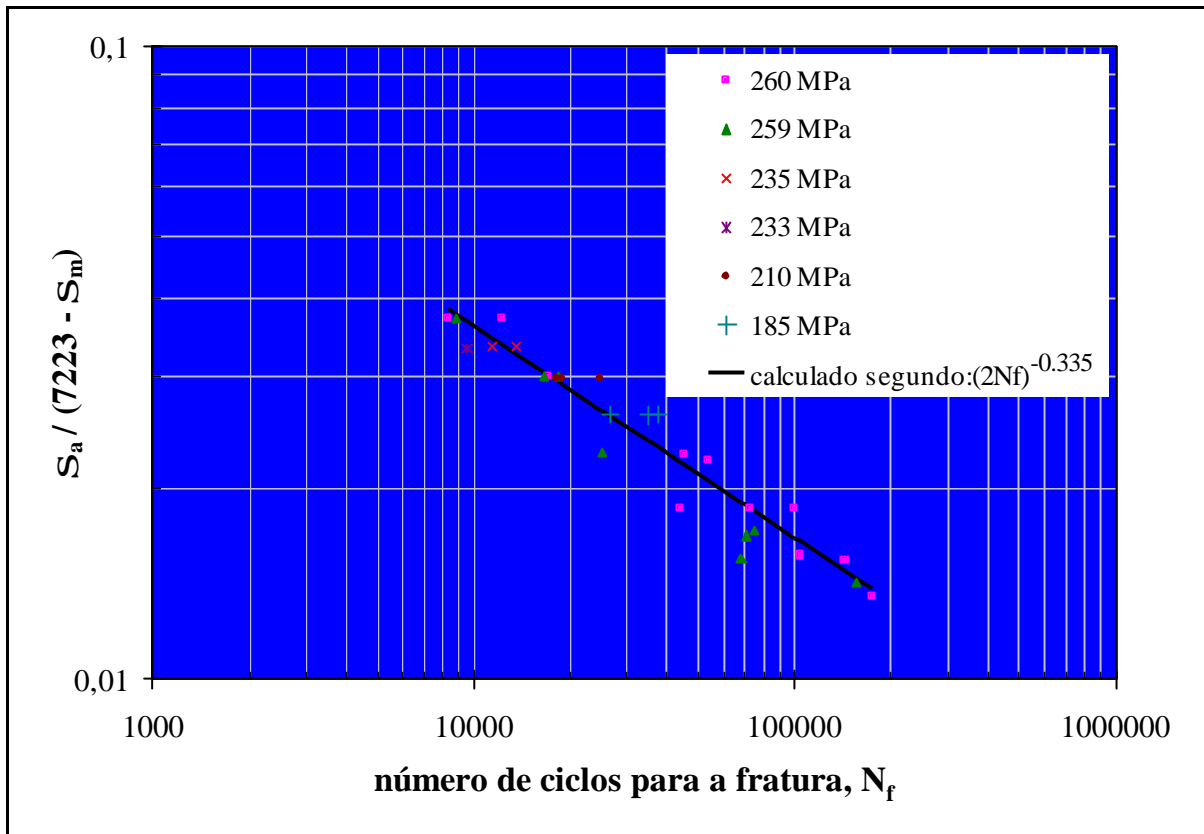
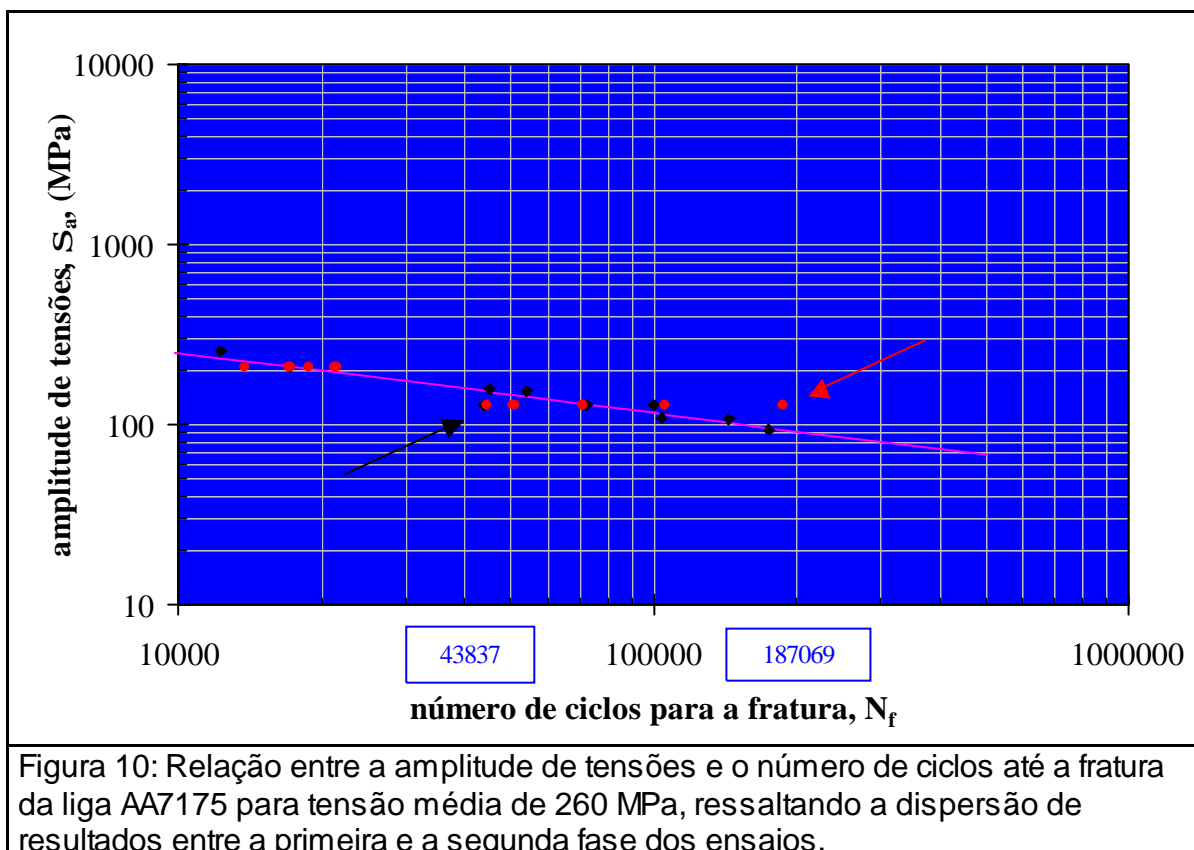


Figura 9: Relação entre $[\sigma_a / (7223 - \sigma_m)]$ e o número de ciclos até a fratura da liga AA7175 em ensaios cíclicos para diferentes valores de tensão média aplicada.

Com base nos resultados apresentados, refez-se alguns ensaios com a tensão média variando de 257 a 260 MPa, e amplitude de tensões variando de 128 a 210 MPa, com o objetivo de verificar as dispersões encontradas no ensaio. Destes ensaios, notou-se grandes dispersões como exemplo, ensaios onde a tensão máxima manteve-se a 469 MPa e a tensão mínima a 50 MPa, o número de ciclos até a fratura variou de 13766 a 21437. E os ensaios com tensão máxima mantida a 389 MPa e tensão mínima a 131 MPa, o número de ciclos até a fratura variou de 44529 a 187069.

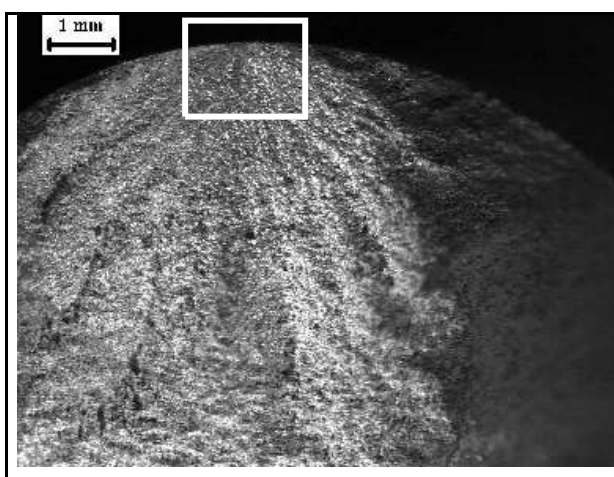
Esta dispersão pode ser vista também na Figura 10 ao comparar-se os resultados da primeira (destacados na cor preta) com a segunda fase (destacados na cor vermelha) de ensaios, realizados com a tensão média de 260 MPa. Mesmo mantendo a amplitude de tensões a 129 MPa, nota-se

resultados de número de ciclos variando de 43837 (indicado pela seta em preto) a 187069 (indicado pela seta em vermelho).

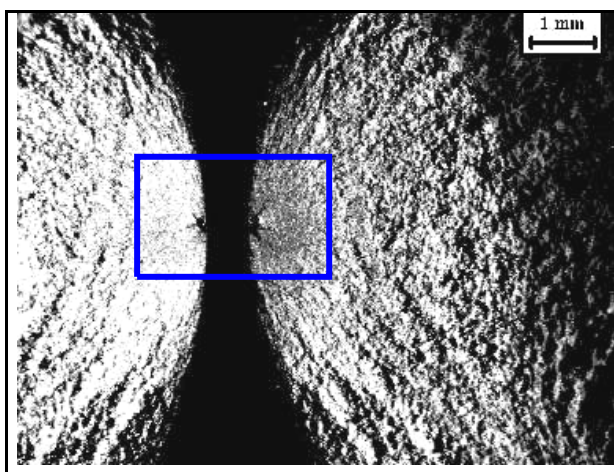


Fazendo-se diferentes combinações com os ensaios de fadiga da primeira e segunda fase, como por exemplo, incluindo ou excluindo dados, é possível obter diferentes valores do expoente de Basquin variando de -0.2633 a -0.3411 e coeficiente de resistência à fadiga variando de 3465 a 9533 MPa, porém a situação que melhor representa o presente trabalho é o expoente de Basquin igual a -0.335 e coeficiente de resistência à fadiga igual a 7223 MPa, como visto anteriormente. Porém, a partir desta dispersão, torna-se necessário a continuidade dos ensaios visando um melhoramento destes parâmetros para o material em estudo. Esta continuidade consiste, além de obter um maior número de dados, estudar melhor os defeitos, presentes ou não, do material em estudo, visualizados nas fotos a seguir.

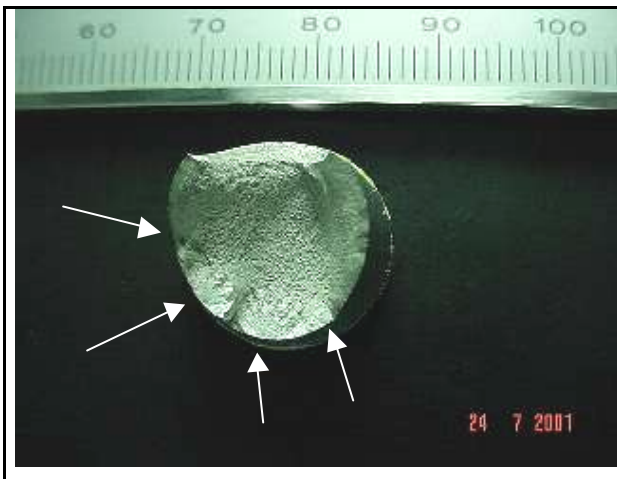
A amostra F13C apresentada na foto 1, mostra uma grande área de propagação de trinca e apresenta resultado (Nf) bem destoante das demais amostras, por não apresentar defeitos na superfície, ao contrário da amostra F31D representada pela foto 2 que não foi considerada neste trabalho, pois a trinca se iniciou à partir de um defeito do material, descaracterizando a autenticidade do ensaio, pois este defeito gera uma concentração de tensões. Na foto 3, tem-se a amostra F10D que apesar de não aparentar defeitos superficiais, também apresentou dispersão de resultados.

**Foto 1:**

- Amostra: **F13C**.
- $\sigma_a=129$ MPa, $\sigma_m=260$ MPa e Nf=187069
- Difere bastante dos demais corpos de prova, por não apresentar defeitos na superfície.

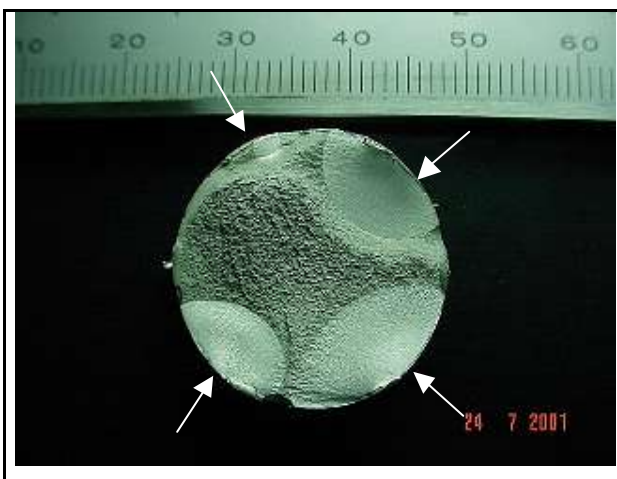
**Foto 2:**

- Início da fratura do corpo de prova **F31D**, foi a partir de um defeito na superfície do material.


Foto 3:

- Amostra: **F10D**.
- $\sigma_a=209$ MPa, $\sigma_m=260$ MPa e $N_f=21305$
- Apresentou 4 trincas de fadiga, apontadas pelas setas.
- Não foi notificado a presença de defeitos.

As amostras F28D e a F31C representadas pelas fotos 4 e 5, respectivamente, não foram consideradas neste trabalho por terem rompido no contato do corpo de prova com a garra de fixação da máquina, pois a pressão exercida pela garra foi excessiva, a ponto de provocar uma tensão localizada. Isto reforça o conceito de que a concentração de tensão acelera o processo de falha por fadiga.


Foto 4:

- Amostra: **F28D**.
- Este corpo de prova não foi considerado válido por ter rompido na extremidade do contato dos dentes da garra de fixação da máquina.
- Nota-se a presença de 4 trincas que representam os 4 pontos de contato da garra.

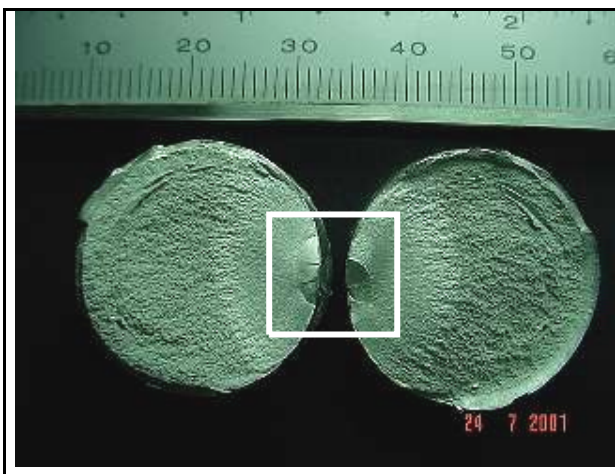


Foto 5:

- Amostra: **F31C**.
- Este corpo de prova não foi considerado válido por ter rompido na extremidade do contato dos dentes da garra de fixação da máquina.
- A trinca de fadiga iniciou-se em uma das marcas dos dentes da garra que comprimia a amostra.

CONCLUSÃO

Através do estudo realizado com a liga AA7175-T1 no LabMat/FEI é possível concluir que:

- O maior número de ciclos necessários para fraturar, foi encontrado na amostra F13C, com valor de 187069, sabendo-se que esta amostra não apresentou defeito superficial.
- Houve grandes dispersões de resultados: para a mesma amplitude de tensões a 129 MPa, nota-se resultados de número de ciclos necessários para a fratura variando de 43837 a 187069.
- Deve-se obter um maior número de dados de fadiga para melhor representar os parâmetros expoente de Basquin e coeficiente de resistência à fadiga, diminuindo as dispersões encontradas.
- Deve-se estudar a micrografia do material e detectar a origem do defeito que esteve presente em algumas amostras, pois este defeito eleva a tensão localizadamente, descaracterizando o ensaio de fadiga.
- Avaliar se as dispersões são agravadas pelo atual acabamento superficial produzido pela usinagem.

BIBLIOGRAFIA

- 1) HATCH, JONH E. Aluminum, Properties and Physical Metallurgy. American Society for Metals Park, Ohio 1984.
- 2) *ALUMINUM TODAY* – Novembro de 2000
- 3) FS – Fundição e Serviços – Janeiro de 2001
- 4) Ensaio dos Materiais – Amauri Garcia, Jaime Alvares Spim e Carlos Alexandre dos Santos – Livros Técnicos e Científicos Editora
- 5) ASM – HANDBOOK : Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials – v.2.
- 6) SURESH, S. Fatigue of Materials Cambrigde Press: Boston 2 ed. 1998 cap.7
- 7) WILLIAM D. CALLISTER, JR. Materials Science and Engineering an Introduction 4 ed. cap.8
- 8) ROBERT L. NORTON - Machine Design: An Integrated Approach cap. 6
- 9) DOWLING, N. E – Mechanical Behavior of Materials, cap. 9 e 14, 1999, Prentice Hall, New Jersey, EUA
- 10) LARRY HORATH – Fundamentals of Materials Science for Technologists.
- 11) GEORGE E. DIETER – Mechanical Metallurgy.
- 12) METALS HANDBOOK – Corrosion – v.13 - pág.291 até 301
- 13) METALS HANDBOOK – Failure analysis and prevention – v.10 – pág. 240, 244, 248
- 14) MTI – publication n.º 18 – pág.32, 33, 49, 50 e 51
- 15) LAMPMAN, S – Fatigue and Fracture, IN: ASM HANDBOOH, Metals Park, EUA, vol. 19, pp. 964-979.

APÊNDICE A

ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

Especificações são tentativas do cliente em especificar ou definir o que ele pretende receber, sendo que a qualidade destas especificações depende da habilidade que este cliente tem em especificar o que ele necessita. Então, a especificação torna-se um critério de aprovação dos produtos que o cliente recebe. Muitas características são usadas para especificar materiais e entre eles estão propriedades físicas, mecânicas, elétricas e outros. Normalmente, uma especificação segue os itens abaixo e são generalizadas na Tabela 3 para os materiais de engenharia, visando praticidade, economia e satisfação tanto do cliente como do fornecedor ^[10]:

- 1) Método de processamento.
- 2) Forma, dimensão e acabamento (atributos físicos).
- 3) Especificações químicas, físicas ou propriedades mecânicas.

Tabela 3: Propriedades gerais dos materiais de engenharia ^[10].

<u>Classes</u>	<u>Propriedades</u>
Geral	Densidade, porosidade, macroestrutura e microestrutura.
Química	Composição, pH, resistência à corrosão.
Físico-Química	Absorção e repulsão de líquidos, ação higroscópica.
Mecânica	Resistência a: tração, compressão cisalhamento, torção e flexão; estático, impacto, limite de fadiga, elasticidade, plasticidade, ductilidade, dureza.
Térmica	Calor específico, expansão térmica, condutividade térmica.
Eletromagnética	Condutividade, permeabilidade, ação galvânica.
Acústica	Transmissão, reflexão, absorção.
Ótica	Calor, transição, reflexão.

APÊNDICE B

Organização das Normas

As normas representam os esforços de grupos de pessoas em entender e definir um procedimento, para que se estabeleça um senso comum no tratamento de algum projeto. Algumas das organizações envolvidas na elaboração das normas de materiais e aplicações são ^[10]:

- **SAE**: Sociedade dos Engenheiros Automotivos;
- **API**: Instituto Americano de Petróleo;
- **AISI**: Instituto Americano de Ferro e Aço;
- **ANSI**: Instituto Nacional Americano de Normas;
- **ASME**: Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos;
- **AA**: Associação do Alumínio.

Uma organização, a Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM), é de particular interesse no que diz respeito a testes de materiais, inclusive desenvolvendo métodos para testes de materiais, construindo novas definições de normas, listando novas especificações de materiais e desenvolvendo novas práticas envolvendo a utilização de materiais. Cada norma ASTM tem uma letra e número (representa a ordem em que foi adotado no grupo) de designação, como segue abaixo ^[10]:

- **A**: Metais ferrosos;
- **B**: Metais não ferrosos;
- **C**: Cimento, cerâmica;
- **D**: Materiais miscelâneos;
- **E**: Testes;
- **F**: Aplicação específica de materiais;
- **G**: Corrosão, deterioração e degradação de materiais;
- **ES**: Normas de emergência.