

2

Revisão Bibliográfica

2.1

O Ultrassom

2.1.1

Frequências Audíveis e Inaudíveis

As ondas acústicas ou som propriamente dito são classificados de acordo com suas frequências e medidos em ciclos por segundo, ou seja, o número de ondas que passam por segundo pelos nossos ouvidos. A unidade “ciclos por segundos” é normalmente conhecida por “Hertz”, abreviatura “Hz”. Assim sendo se tivermos um som com 280 Hz, significa que por segundo passam 280 ciclos ou ondas por nossos ouvidos. Note que frequências acima de 20.000 Hz são inaudíveis denominadas frequências ultrassônicas e as abaixo de 20hz infrassom.

No campo de Audibilidade das Vibrações Mecânicas, considera-se 20 kHz o limite superior audível e denomina-se a partir desta, as frequências ultrassônicas. [20]

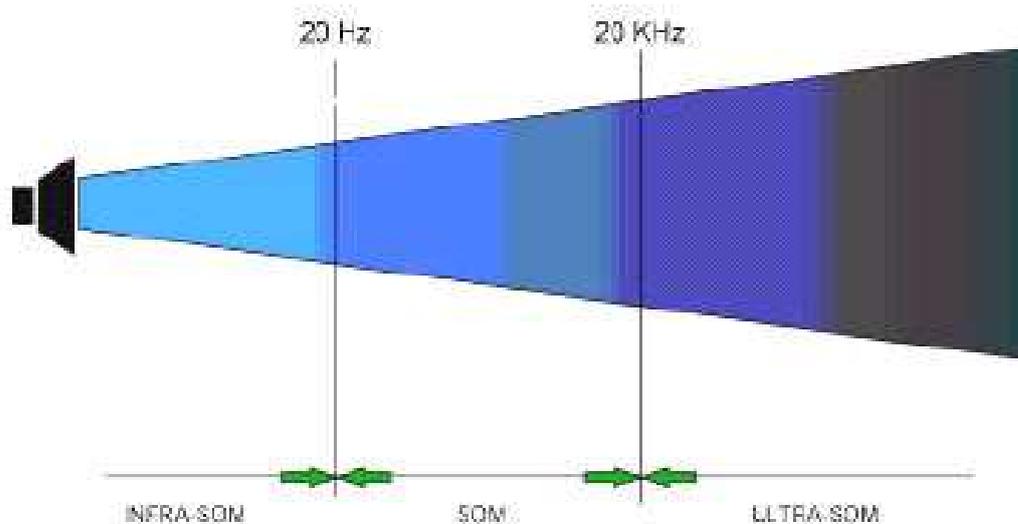


Figura 1-Campo de audibilidade das vibrações Mecânicas[20]

2.1.2

O Ouvido Humano

O ouvido consiste em três partes básicas - o ouvido externo, o ouvido médio, e o ouvido interno. Cada parte serve para uma função específica para interpretar o som.

O ouvido externo serve para coletar o som e o levar por um canal ao ouvido médio.

O ouvido médio serve para transformar a energia de uma onda sonora em vibrações internas na estrutura óssea da ouvido médio e finalmente transformar estas vibrações em uma onda de compressão ao ouvido interno.

O ouvido interno serve para transformar a energia da onda de compressão dentro de um fluido em impulsos nervosos que podem ser transmitidos ao cérebro. As três partes do ouvido podem ser vistas acima.[20]



Figura 2 – O ouvido humano [20]

2.1.3

Princípios das Vibrações Mecânicas

A propagação de um sinal pode aparecer no campo "elétrico" sinais de RF (radio frequência) ou "mecânico" vibração do meio. A esta ultima estrutura damos

o nome de ULTRASOM em referência à propagação das ondas sonoras (áudio ou som).

Pode parecer um tanto estranho dizer-se propagação mecânica de um sinal, mas este é o processo que realmente ocorre quando aplicamos a um material qualquer "deformação" cíclica.

Todo material é constituído por átomos e moléculas que formam uma estrutura de ligação mais ou menos elásticas entre si.

Assim, em repouso, as forças (eletrostáticas) que unem as moléculas do material encontram-se equilibradas. Se por qualquer motivo, este repouso é forçado mecanicamente (deformação), a tendência dessas forças internas é recompor o equilíbrio, daí a designação de elasticidade.

Quando aplicamos uma deformação cíclica (vibração) ao material, ela se "propaga" viajando em ondas de deformações percorrendo toda sua extensão. Dizemos que esta propagação se dá a uma velocidade bem específica que é definida pela elasticidade do material.

O ar é considerado um meio elástico para propagação mecânica de uma vibração, a maior prova disto temos quando "ouvimos" um som.

O som nada mais é do que uma vibração mecânica que se propaga elasticamente pelo ar, a uma velocidade média de 344 metros por segundo a temperatura de 20 graus.

Algumas frequências que podemos "ouvir" encontram-se na faixa de 20 a 20.000 Hertz (aproximadamente), acima disto nossos ouvidos já não mais percebem estas vibrações.

As frequências superiores a 20.000 Hertz são chamadas de ULTRASSOM, e se propagam pelo ar semelhante a uma onda acústica, porém nós não as ouvimos mais.

Não obstante a existência da propagação mecânica de uma vibração existe um efeito contrário que impede ou "limita" esta propagação: é o amortecimento ou damp.

As moléculas (átomos) de um material estão presas umas as outras "elasticamente". A vibração do ar é um processo de expansão e compressão (variação de pressão) que se propaga numa direção (percurso), com intensidade decrescente.

Considerando os materiais como "ideais", dizemos que a propagação existe unicamente pelo efeito "mola" ou deformação elástica.

A vibração é um movimento oscilante ou de trepidação de uma máquina ou de algum elemento de máquina, saindo de sua posição de estabilidade (estática ou dinâmica).

Como exemplo, tomemos uma massa suspensa presa ao referencial por uma mola, e que se movimenta a partir de sua posição neutra (repouso) até os limites superior e inferior, retornando à sua posição neutra.

Neste ponto, estará completo UM CICLO DE OSCILAÇÃO.

A VIBRAÇÃO acontece quando este ciclo se repete várias vezes numa unidade de tempo. É importante esclarecer que o TEMPO gasto para completar UM CICLO é chamado PERÍODO e, a quantidade de ciclos numa unidade de tempo denomina-se FREQUÊNCIA DO MOVIMENTO.

Registrando graficamente este movimento temos o traçado senoidal desta "oscilação", que obedece às leis cinemáticas do "MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES - MHS".[21]

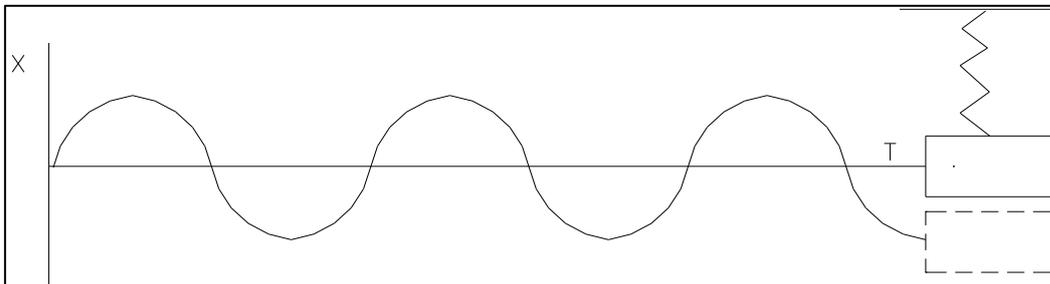


Figura 3 – Esquema representativo da frequência natural dos materiais[21]

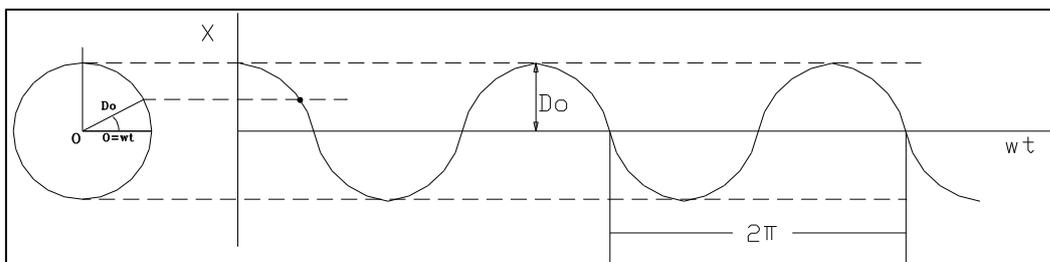


Figura 4 – Movimento harmônico[21]

Movimento harmônico com projeção de um ponto que se move numa circunferência.

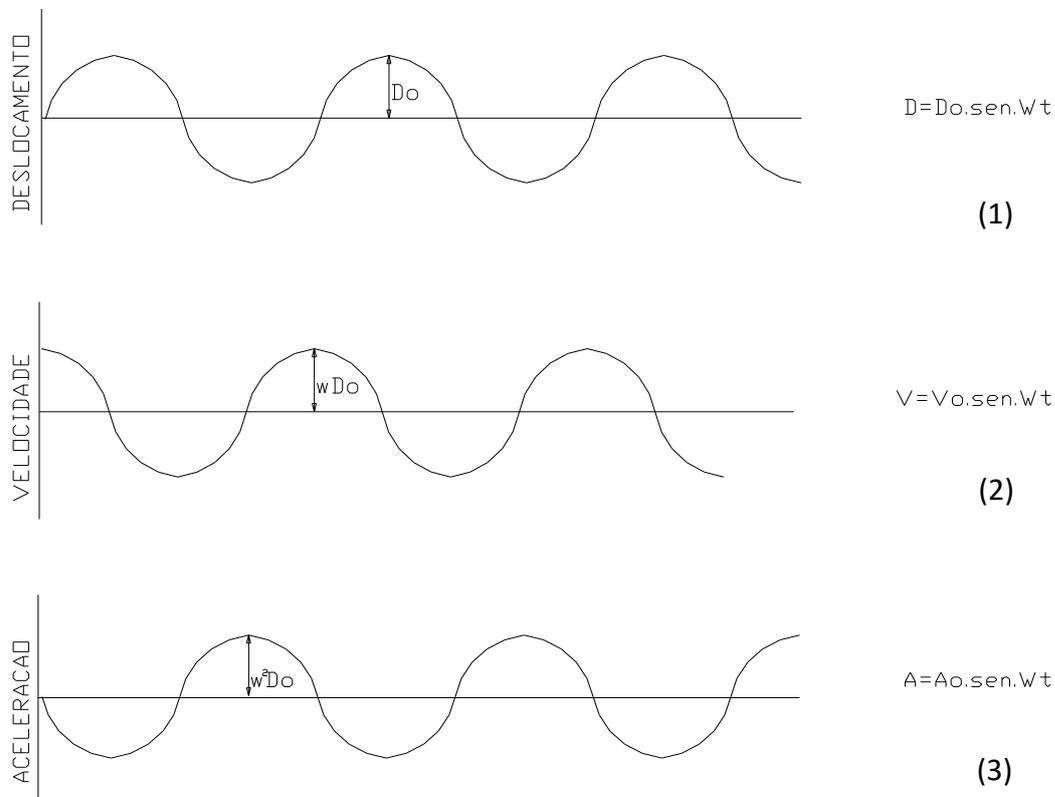


Figura 5 – As componentes do movimento harmônico. [21]

No movimento harmônico, a velocidade e a aceleração estão à frente do deslocamento por $\pi/2$ e π .

$$W = 2 \cdot \pi \cdot n/60 \quad (4)$$

Onde W é dado em rotações por minuto.

Porém, nos materiais "naturais", sabemos que esta deformação elástica, nunca retoma suas características iniciais, ou seja, existe uma perda, ou

"absorção". Assim uma pressão inicial na fonte de transmissão é "abrandada" com o percurso.

A atenuação é o decréscimo da intensidade (energia sonora) com a distância. As frequências mais altas apresentam maior amortecimento do que as mais baixas.

Assim, por exemplo, um sinal de 20.000 Hertz vai chegar mais "longe" do que um sinal de mesma intensidade com frequência de 40.000 hertz. De forma geral podemos afirmar que o "*damp*" é proporcional ao quadrado da frequência do sinal.

Desta forma, obtemos o conceito de impedância na eletrônica, ou seja, a propriedade de um componente impedir mais ou menos a passagem de uma corrente elétrica,

Em acústica também definimos a impedância de um material como sendo a propriedade que ele possui em transmitir uma vibração acústica com maior ou menor facilidade.

A impedância acústica de um material é definida como o produto da densidade pela velocidade acústica dele ($Z = \rho \cdot V$) (5) . Quando dois materiais com impedâncias acústicas diferentes são justapostos, a passagem de uma vibração mecânica (ondas sonoras) pode ser refletida.

Assim, ao encontrar uma descontinuidade de impedância acústica (impedância mismatch) ocorre uma reflexão parcial ou total das ondas vibratórias. Acabamos de definir o É C O = um sinal sonoro que se propaga pelo ar, ao atingir um alvo (parede, por exemplo), reflete e retorna. Para alterar a impedância acústica de um material podemos, por exemplo, alterar a sua densidade, tornando-o com maior "absorção" ou maior "transmissão".

2.1.4

Frequência Natural

Todo corpo na natureza possui uma frequência natural própria de sua constituição física.

De uma folha de papel, barra de aço aos mais complexos sistemas, todos possuem frequência natural própria.

Matematicamente, ela é definida como sendo a relação entre a Rigidez (K) e a Massa (M) do corpo/sistema.

$$W_n = 2\pi\sqrt{k/m} , \quad (6)$$

Onde W_n é a frequência natural dada em rotações por minuto ou Hertz.

A seguir, ilustramos um Sistema Massa-Mola onde estão presentes a Massa “M” , a Força de Excitação “Fexc” , a constante de Rigidez “K” e a constante de Amortecimento “C” . A correta combinação desses fatores gera a estabilidade dinâmica desejada.[7]

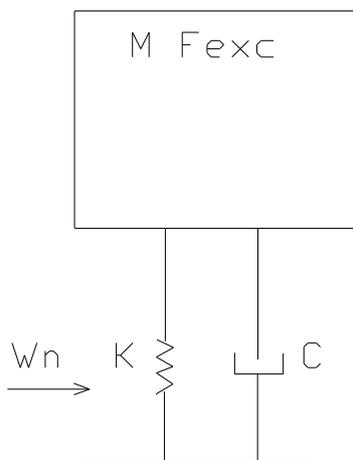


Figura 6 — Amortecimento[7]

Esta figura pode ser entendida como qualquer parte de máquinas, ou seja, uma chapa de carcaça, mesa de mancal, eixo, rolamentos e seus componentes, base de concreto, ou ainda, qualquer corpo na natureza como, por exemplo, um sonotrodo.

2.1.5

Amortecimento ou Atrito Interno

O amortecimento ou atrito interno é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto microscópica (Lazan, 1968), sendo particularmente sensível à presença de trincas e micro trincas (Dieterle & Banchmann, 1981).

A tensão mecânica induzida pelo gradiente de temperatura do choque térmico provoca a nucleação e propagação de micro trincas e trincas que degradam as propriedades mecânicas do material determinando em grande parte a sua vida útil (Hasselman, 1969; Kingery, 1955).

O amortecimento é o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema dinâmico é dissipada (Silva, 2007), principalmente pela conversão em calor por forças dissipativas.

O amortecimento de um sistema ou material pode ser classificado de três formas principais: interno, estrutural e fluídico. O interno está associado aos defeitos na microestrutura, granularidade e impurezas do material e a efeitos termo elástico causado por gradientes locais de temperatura.

Enquanto que o estrutural está associado a perdas de energia por atrito em juntas, parafusos e articulações semirrígidas.

Por último, o fluídico ocorre por resistência ao arraste em meio fluídico, por exemplo, a conversão de energia cinética de um pêndulo em energia térmica para o ar.

O amortecimento interno está associado aos defeitos de microestrutura, como por exemplo, contornos de grãos e impurezas; efeitos termo elásticos causados por gradientes locais de temperatura; efeitos de correntes de Foucault em materiais ferromagnéticos; movimentos de discordâncias em metais; movimento das cadeias em polímeros.

Existem dois tipos diferentes de modelos que são utilizados para representar o amortecimento interno: o amortecimento visco elástico e o amortecimento histerético.

O nome histerético é hoje impróprio, porque todos os tipos de amortecimento interno estão associados com efeitos da curva de histerese. A tensão e a deformação estão relacionadas como mostra abaixo.

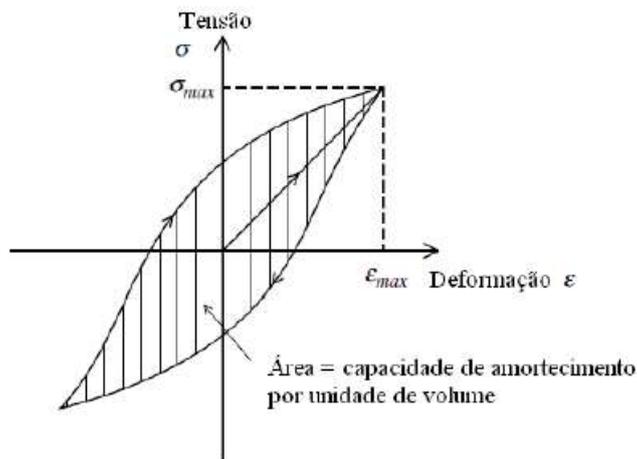


Figura 7 – Histerese. [23]

Desta forma, a capacidade de amortecimento por unidade de volume, chamada de d , é dada por uma integral cíclica:[23]

$$d = \oint \sigma d\varepsilon \quad (7)$$

Para qualquer dispositivo amortecedor há uma curva de histerese correspondente. Neste caso, a integral cíclica da força com o respectivo deslocamento, que corresponde à área da curva de histerese, é igual ao trabalho feito pela força de amortecimento.

É deste fenômeno que se conclui que esta integral é a energia dissipada por ciclo de movimento. Isto é, a capacidade de amortecimento, quando dividida pelo volume do material, fornece a capacidade de amortecimento por unidade de volume.

2.1.6

Princípios da tecnologia ultrassônica de potência

Transdutores e conjuntos acústicos são dispositivos que convertem energia elétrica em vibração.

O transdutor realiza a conversão de energia, o transformador ajusta a proporção entre a força e a velocidade e finalmente, o sonotrodo direciona e aplica esta energia para realizar o trabalho desejado.



Figura 8 - Conjunto Acústico

Os transdutores têm duas frequências de operação, que são facilmente identificáveis na curva característica. O pico corresponde à frequência de antirressonância (velocidade de vibração máxima) onde operam o sistema de solda, corte e eletro médicos.

O vale corresponde à frequência de ressonância (força máxima) onde operam os sistemas de limpeza. [22]

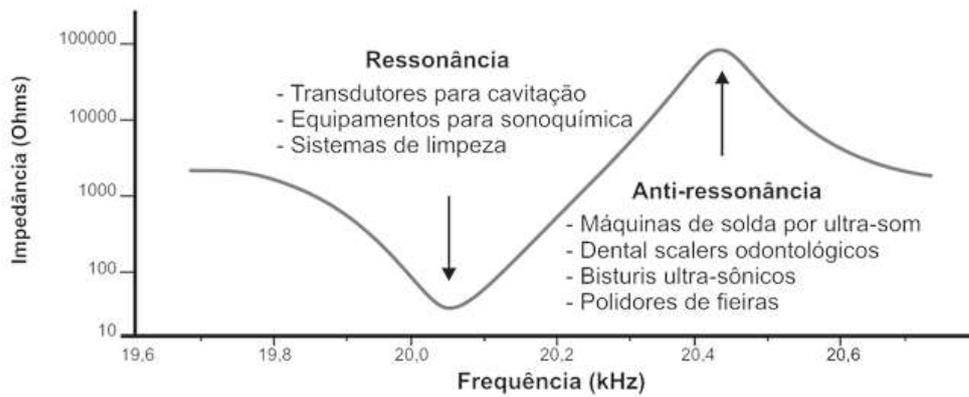


Figura 9 - Curva de impedância em função da frequência de um transdutor[22]

2.1.7

Sintonia de Sonotrodos

O sonotrodo deve estar sintonizado corretamente para funcionar. Isso faz com que o sonotrodo não aqueça e tenha vida longa. A tolerância recomendada de ajuste da frequência de operação é de $\pm 0,25\%$, por exemplo, 20.000 ± 50 Hz.

Desta forma algumas técnicas devem ser usadas para a usinagem dos sonotrodos conforme descrito a seguir. Para aumentar a frequência de operação podemos lançar mão do artifício de redução do comprimento do sonotrodo.

Ao passo que, para baixar a frequência de operação devemos alterar a geometria dos sonotrodos conforme figura 10.



Figura 10-Tecnicas de usinagem para ajuste da frequência de operação dos sonotrodos[22]

2.1.8

O Dispositivo vibrante para corte por Ultrassom

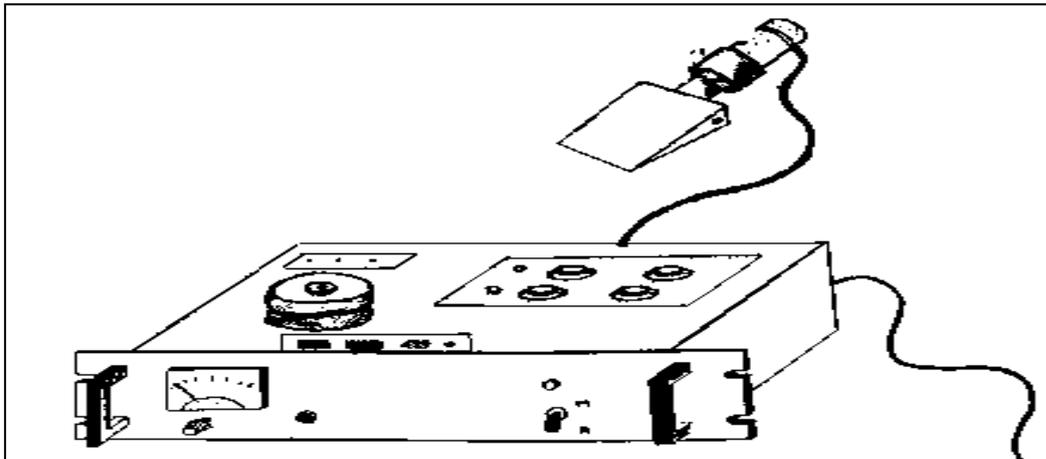


Figura 11 – Conjunto de corte por ultrassom

O Dispositivo vibrante para corte por Ultrassom compreende: (I) um transmissor (transdutor eletroacústico) onde a sua função é transformar um sinal elétrico sinusoidal em vibração mecânica da mesma frequência; (II) um reforço (amplificador de alongamento mecânico) no qual seu papel consiste em amplificar a amplitude das vibrações produzidas pelo transmissor; e a lâmina de corte (lâmina sonotrodo) cujo papel é cortar o produto, e amplificar o sinal.

O gerador eletrônico engloba: (I) o gerador de sinal (20 kHz) cuja função é a de converter o sinal sinusoidal da rede (60 Hz) para um sinal sinusoidal de frequência F_0 (F_0 : frequência de ressonância do conjunto de vibração) objetivando alimentar o transmissor por meio de um cabo coaxial; (II) O sistema de variação de frequência automática (VAF) cuja finalidade é proporcionar a frequência elétrica igual à frequência de ressonância do conjunto de vibração.

Ressalte-se que a variação de temperatura de um conjunto vibrante provoca uma mudança na sua frequência de ressonância. (Exemplo 20° a 60° C \Rightarrow $F = 100$ Hz, a frequência das lâminas é de entre 19.600 e 20.300 Hz); (III) O circuito de segurança (placa instalada do lado de fora do bastidor) cujo papel desta placa é de evitar danos para o equipamento, no caso de mau funcionamento.

Este circuito fornece as seguintes informações: falta de ultrassom ou potência absorvida pelo vibrar excessivamente grande.

Esta informação é utilizada através da automatização de parar ou proibir o movimento do carro cortador; e de Interromper o funcionamento do gerador.

2.1.9

Sonotrodo defeituoso

Os sonotrodos devem estar de acordo com uma série de requisitos. Os sonotrodos que não atendam aos requisitos, que foram mal concebidos ou mal fabricados ou que tenham sido mal utilizados nas linhas de produção, são a fonte mais comum de erros que perturbam o processo de fabricação.

Neste trabalho estaremos investigando os defeitos em sonotrodos ligados ao material e utilizamos um sonotrodo tipo faca, que serve para cortar perfis de borracha, o qual está inserido em um processo de fabricação de pneus.



Figura 12 - Foto de um Sonotrodo tipo Faca – Trincado, Utilizado para este estudo, indicada pelo círculo vermelho.

2.2

Fluorescência de Raios X

XRF é um acrônimo para fluorescência de raios-x, um processo pelo qual os elétrons são deslocados de suas posições orbitais atômicas, liberando uma explosão de energia que é característica de um elemento químico específico.

Esta liberação de energia é então registrada pelo detector em seguida pelo instrumento XRF que, por sua vez, classifica as energias por elemento químico.

Um feixe de raios-x com energia suficiente para afetar os elétrons nas órbitas internas dos átomos de uma amostra é criado por um tubo de raios X dentro de um analisador portátil. O feixe de raios X é, então, emitido a partir da extremidade frontal do analisador XRF.

O feixe de raios-x, em seguida, interage com os átomos da amostra por deslocamento dos elétrons das órbitas internas do átomo. Este deslocamento ocorre como um resultado da diferença de energia entre o feixe de raios-x primária emitida a partir do analisador e a energia de ligação que mantém as suas órbitas com elétrons apropriados; o deslocamento acontece quando a energia do feixe de raios-x é superior à energia de ligação dos elétrons com o qual interagem.

Os elétrons são fixados ao átomo com energias específicas em suas posições e isso determina em que órbitas os elétrons pertencerão de acordo com o átomo em questão.

Além disso, o espaçamento entre as orbitais de um átomo é único para os átomos de cada elemento, assim, um átomo de potássio (K) tem espaçamento diferente entre as suas camadas de elétrons em relação a um átomo de ouro (Au), ou de prata (Ag), etc.

Quando os elétrons são “batidos” para fora de sua órbita, eles deixam para trás vagas, fazendo com que o átomo se torne instável. O átomo deve corrigir imediatamente a instabilidade, preenchendo as vagas que os elétrons deslocados deixaram para trás.

Essas vagas podem ser preenchidas a partir de órbitas mais elevadas que se movem para baixo para uma órbita mais baixa, onde uma há uma vaga. Por exemplo, se um elétron é deslocado do nível mais interno do átomo (o mais próximo do núcleo), um elétron a partir do próximo nível pode mover-se para baixo para preencher a vaga. Este fenômeno dá-se o nome de fluorescência.

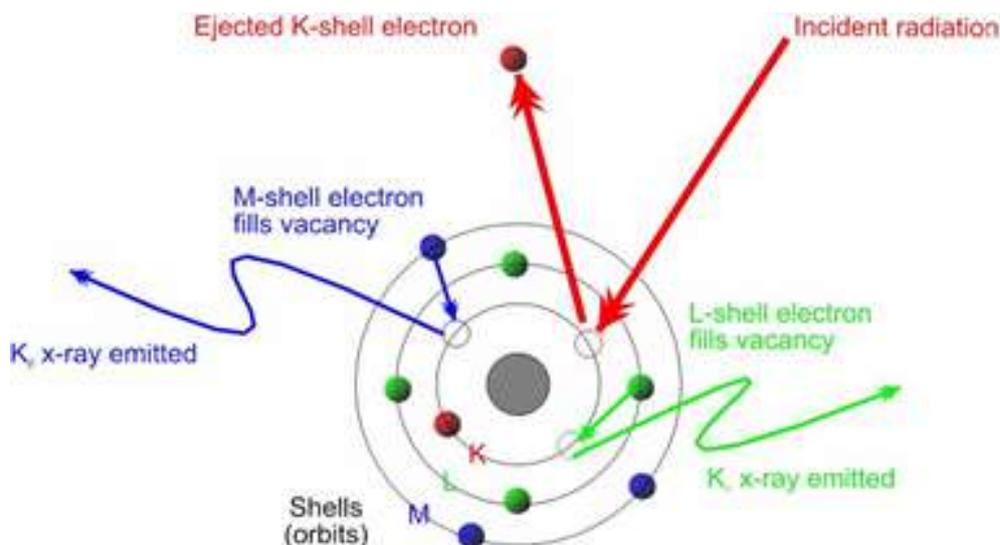


Figura 13 – Processo de fluorescência [32]

Os elétrons detêm energias de ligação mais elevadas quanto mais próximo eles estão do núcleo do átomo. Portanto, um elétron perde um pouco de energia quando ele cai de uma órbita do elétron superior em comparação a uma órbita do elétron mais perto do núcleo.

A quantidade de energia perdida é equivalente a diferença de energia entre os dois movimentos dos elétrons, que é determinada pela distância entre eles. A distância entre os dois orbitais é única para cada elemento, conforme mencionado acima.

A energia perdida pode ser usada para identificar o elemento a partir do qual emana a energia, porque a quantidade de energia perdida no processo de fluorescência é única para cada elemento.

As energias fluorescentes individuais detectadas são específicas para os elementos que estão presentes na amostra. A fim de determinar a quantidade de cada elemento presente, a proporção em que as energias individuais aparecem são calculadas pelo instrumento ou por um software.

Todo o processo de fluorescência ocorre em pequenas fações de um segundo. Uma medição usando este processo pode ser feita com uma pistola de mão moderna, numa questão de segundos.

O tempo real necessário para uma medição irá depender da natureza da amostra e os níveis de interesse. Níveis elevados percentuais levarão alguns segundos, enquanto os níveis de parte por milhão demorarão alguns minutos.

O espectrómetro de fluorescência de raios-x é um instrumento que determina química e analiticamente cada elemento presente numa amostra, bem como a quantidade dos elementos presentes quando aplicável.

Uma característica única dos espectrômetros de fluorescência de raios x é que o tipo de dispersão de energia pode ser utilizado de forma não destrutiva, o que os torna apropriados para as amostras que devem ser conservados ou não podem ser alterados.

Vários tipos de análises, usando a técnica de PMI (identificação do material positivo), podem ser realizadas das quais, destacamos: a análise de ouro e metais preciosos, identificação grau Alloy, análises de solo, análise Mina-face, controle de qualidade do minério, a análise de polímeros, chumbo e outros metais pesados, análise toxicológica, análise pigmento, análise cerâmica, análise de produtos de consumo, etc...

Quando iluminados por um feixe de raios X de energia suficiente, os átomos de um material podem absorver fótons do feixe e, no processo de recombinação ou desexcitação, emitir raios X característicos do material. Este efeito é denominado fluorescência.

A figura abaixo mostra as energias mínimas para absorção pela camada K (ou seja, a energia de ligação da camada K), e as energias das transições K_{α} (energia de transição partículas tipo alfa), K_{β} (energia de transição partículas tipo beta) e K_{abs} (energia de absorção dos elétrons da borda), para cada elemento . Nota-se que as energias crescem gradativamente com o número atômico Z.

Tabela 1 – Energias (em keV) das transições K dos elementos de $23 < Z < 30$ [26]

Elem.	Z	K_{α}	K_{β}	K_{abs} (borda)
V	23	4.95	5.43	5.47
Cr	24	5.41	5.95	5.99
Mn	25	5.90	6.49	6.54
Fe	26	6.40	7.06	7.11
Co	27	6.93	7.65	7.71
Ni	28	7.48	8.26	8.33
Cu	29	8.05	8.91	8.98
Zn	30	8.64	9.57	9.66

2.2.1

Dados Qualitativos XRF

O espectro bruto é chamado de dados qualitativos porque informa ao utilizador os elementos presentes numa amostra, mas não contém informação sobre a quantidade de cada elemento que está presente, a menos que os dados sejam processados.

Os dados XRF Raw são excelentes para a análise de amostras que são não-uniformes ou não homogêneas, ou para amostras em que se quer investigar o átomo que está contido na amostra, mas não importa a sua concentração.

Ele também pode ser usado para verificar todos os dados quantitativos questionáveis, porque enquanto o processamento de dados matemático pode potencialmente conter erros, o espectro bruto nunca mente; se um pico está presente a certa energia fluorescente, o elemento para o qual a energia que corresponde certamente está presente na amostra.

2.2.2

Dados quantitativos XRF: calibrações e quantificação

Os dados quantitativos em XRF informam ao utilizador que a quantidade absoluta de um elemento está presente numa amostra. Este tipo de dados contém um número e uma unidade, geralmente ppm (partes por milhão) ou peso%. Podemos usar calibrações, a fim de tornar os dados qualitativos brutos em dados quantitativos. Existem vários tipos de calibrações possíveis.

Dois tipos típicos são FP (parâmetros fundamentais) e calibrações empíricas. As calibrações são feitas usando amostras com concentrações conhecidas de elementos de interesse para criar uma curva de calibração que relaciona concentrações conhecidas específicas para alturas de pico.

Esta curva pode, então, ser utilizada para quantificar as concentrações de amostras desconhecidas por relação entre a altura do pico da curva construída a partir de amostras conhecidas.

Existem algumas diferenças significativas na forma como exatamente essas calibrações são criadas e como elas funcionam, dependendo do tipo de calibração. Alguns dependem mais de algoritmos matemáticos, enquanto outros

são puramente feitas por análise de amostras conhecidas que são semelhantes às amostras desconhecidas que o usuário deseja quantificar.

Os dados quantitativos podem ser calculados e informados pelo instrumento, sem exigir qualquer entrada de dados adicional pelo usuário. No entanto, é importante entender quando dados quantitativos são confiáveis. Por exemplo, se você tentar fazer uma análise de amostras de metal usando uma calibração que foi destinada para a análise das amostras de solo, o seu instrumento irá gerar números, mas os números não farão qualquer sentido.

Para os dados quantitativos precisos as seguintes condições devem ser atendidas:

- 1- Amostra deve ser homogênea (sem camadas, sem ferrugem, sem inclusões, etc.);
- 2- Calibração utilizada para a quantificação deve ser adequada ao material da amostra analisada;
- 3- A amostra deve cumprir condições "de espessura infinita", o que significa que a amostra deve ser grossa o suficiente para atenuar todos os raios X primários do instrumento XRF, sem que nenhum dos raios X primários escape para o outro lado da amostra;
- 4- Deve haver amostras de concentração conhecida disponíveis, a fim de verificar e / ou criar a calibração.

2.2.3

Dados Semi-quantitativos XRF

Em alguns casos, as condições de dados quantitativos confiáveis não são cumpridas, mas dados qualitativos não são suficientes para responder às perguntas da composição química do material.

Nestas situações, há uma terceira opção. Processamento de dados semi-quantitativa permite ao utilizador comparar dados espectrais de amostras a fim de obter informação sobre as concentrações relativas dos elementos de amostra para amostra.

Embora este método não forneça valores absolutos de concentração, pode ser usada para determinar as concentrações de elementos relativos entre as amostras; por exemplo, este método poderá fornecer informações tais como

"amostra A contém cerca de 20% mais de Ag (prata) do que a amostra B." Este tipo de dados é extraído através do cálculo da área sob cada pico de interesse, que é equivalente ao número de contagens.

Este tipo de dados é apropriado em situações em que uma calibração e / ou amostras de concentrações conhecidas não existem, mas comparando as amostras em termos de concentração do elemento é necessário. [31]

2.3

Teoria de Elementos Finitos

A ideia central do MEF é discretizar o domínio, representando-o, ainda que de forma aproximada, por uma reunião de um número finito de elementos; e resolver não o problema original, mas sim um que lhe é associado na sua forma simplificada.

No caso de um domínio plano, os elementos podem ser triângulos ou quadriláteros.

Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores.

A formulação do MEF pode ser baseada no método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio, ou em métodos híbridos e mistos de todos estes métodos. O método que apresenta uma maior simplicidade e, conseqüentemente, uma maior versatilidade é o método dos deslocamentos, sendo este o único que é abordado neste trabalho.

Associado ao método dos deslocamentos estão vários conceitos no âmbito das estruturas reticuladas, como por exemplo, as noções de grau de liberdade, deslocamento generalizado, força generalizada, equilíbrio, matriz de rigidez, vetor solicitação, montagem, introdução de condições de apoio, etc.

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir o integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume V_i).

Esta técnica é ilustrada com o seguinte exemplo, que corresponde a integral de volume de uma função f .

$$\int_V f \, dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f \, dV \quad (8)$$

Onde,

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (9)$$

Se for possível calcular todas as integrais estendidas aos subdomínios V_i , basta efetuar o somatório correspondente ao segundo membro de (1) para se obter o integral estendido a todo o domínio.

Cada subdomínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples (e.g., segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo). O somatório indicado em (1) vai dar origem à operação designada “assemblagem”, que apresenta muitas semelhanças com a que é efetuada nas estruturas reticuladas.

A equação integral referida no início desta seção é proveniente da aplicação do método dos resíduos pesados ou de um princípio variacional. No caso da aplicação do MEF à análise de estruturas a formulação mais intuitiva é a que se baseia no Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV).[27]

2.3.1

O Software ANSYS

O ANSYS é um software que existe há mais quarenta anos muito utilizado nas indústrias aeronáutica e automotiva. Este software está dividido em três ferramentas principais chamadas: pré-processador (*Preprocessor*), solução (*Solution*) e pós-processador (*Postprocessor*). Além disso, destina-se também a solução de problemas mecânicos incluindo a análise de estruturas dinâmicas e estáticas, a análise de transferência de calor e fluidodinâmica, bem como a análise de problemas acústicos e eletromagnetismo. Neste trabalho utilizaremos o

software ANSYS *workbench* para analisar um sonotrodo conforme o fluxo de análise abaixo.

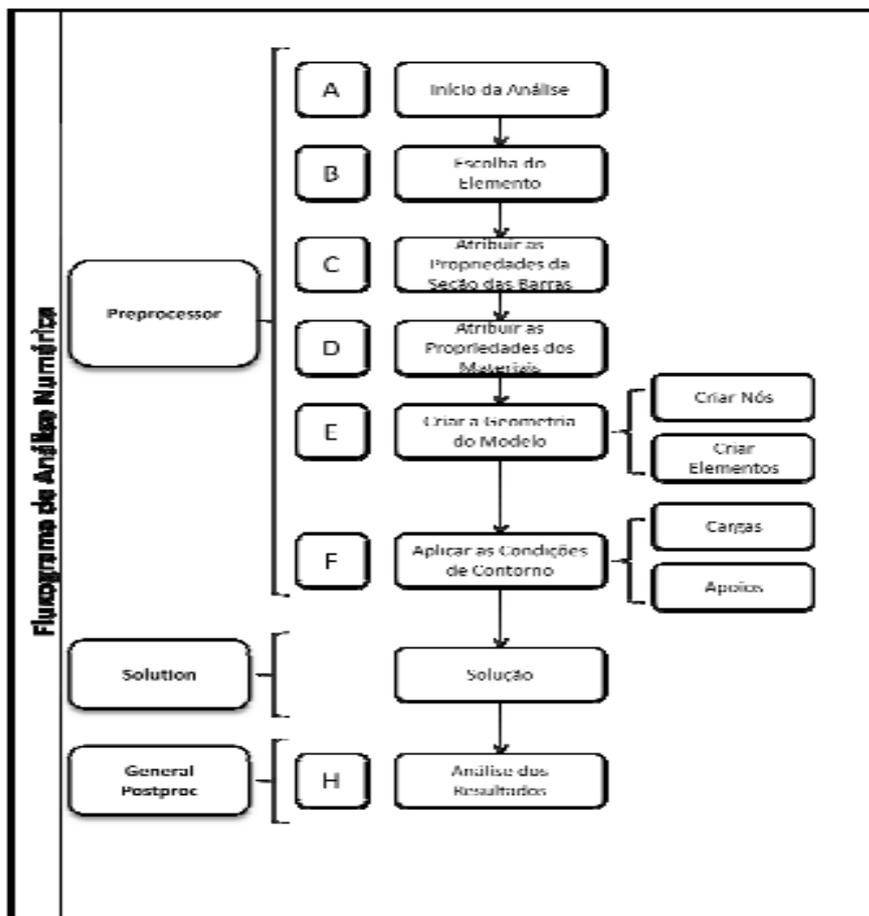


Figura 14: Fluxo de análise de um sonotrodo utilizando o software ANSYS [10]

2.3.2

O Critério de Falha de Von Mises

O critério de falha de Von Mises indica que o escoamento de um material sólido inicia quando o segundo invariante derivatório de tensão J_2 atinge um valor crítico.

O critério é por esta razão algumas vezes denominado plasticidade ou teoria de escoamento J_2 . É parte de uma teoria da plasticidade melhor aplicável a materiais dúcteis, como os metais. Antes do escoamento a resposta do material é assumida ser elástica.

Em ciência dos materiais e engenharia o critério de escoamento de Von Mises pode ser formulado em termos da tensão equivalente de Von Mises, σ_v ,

um valor escalar de tensão que pode ser determinado a partir do tensor tensão de Cauchy. Neste caso um material é dito estar em estado de início de escoamento quando sua tensão equivalente de Von Misses atinge um valor crítico denominado tensão de escoamento σ_e .

A tensão equivalente de Von Misses σ_v é usada para prevenir escoamento do material quando submetido a qualquer condição de carregamento a partir de resultados obtidos de testes de tração simples. A tensão equivalente de Von Misses satisfaz a propriedade de que dois estados de tensão com mesma energia de distorção tem a mesma tensão equivalente de Von Misses.

Como o critério de Von Misses independe do primeiro invariante de tensão é, portanto aplicável para a análise de deformação plástica de materiais dúcteis, tais como os metais, sendo a hipótese básica para o comportamento destes materiais a independência da componente hidrostática do tensor tensão. Embora formulado por James Clerk Maxwell em 1865, o critério é atribuído a Richard Von Misses (1913).

Em mecânica do contínuo, o tensor tensão de Cauchy $\boldsymbol{\sigma}$, tensor tensão verdadeira 1 ou simplesmente denominado tensor tensão, denominado em memória de Augustin-Louis Cauchy, é um tensor de segunda ordem, com nove componentes σ_{ij} , que define completamente o estado de tensão em um ponto no domínio de um material em sua configuração deformada. O tensor relaciona um vetor diretor de comprimento unitário \mathbf{n} com o vetor tensão $\mathbf{T}(\mathbf{n})$ sobre uma superfície imaginária perpendicular a \mathbf{n} :

$$\mathbf{T}^{(\mathbf{n})} = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad \text{ou} \quad T_j^{(n)} = \sigma_{ij} n_i. \quad (10)$$

Para os eixos coordenados da figura ao lado, usando a notação indicial,

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

O tensor de *Cauchy* obedece à lei de transformação de tensores sobre uma mudança de sistema de coordenadas. Uma representação gráfica desta lei de transformação é o círculo de Mohr para tensões.

O círculo de *Mohr*, denominado em memória de seu idealizador, Christian Otto *Mohr*, é um método gráfico bidimensional representativo da lei de transformação do tensor de *Cauchy*.

Após realizar uma análise de tensões em um corpo material assumido como um meio contínuo, as componentes do tensor de *Cauchy* em um determinado ponto do corpo são conhecidas em relação a um sistema de coordenadas.

O círculo de *Mohr* é então usado para determinar graficamente as componentes de tensão em relação a um sistema rotacionado, isto é, agindo sobre um plano de orientação diferente passando sobre o ponto. A abscissa σ_n e a ordenada τ_n de cada ponto do círculo são as magnitudes da tensão normal e da tensão cisalhante atuando sobre um sistema de coordenadas rotacionado.

Em outras palavras, o círculo é o *locus* dos pontos que representam o estado de tensão sobre planos individuais em todas as suas orientações, onde os eixos representam os eixos principais dos elementos de tensão.

Karl Culmann foi o primeiro a conceber uma representação gráfica para tensões, considerando tensões normais e cisalhantes em vigas horizontais sob flexão.

A contribuição de *Mohr* estendeu o uso desta representação para estados de tensão bi e tridimensional e desenvolveu um critério de falha baseado sobre o círculo de tensão 1. O círculo de *Mohr* pode ser aplicado a qualquer matriz simétrica 2x2, incluindo os tensores de deformação e momento de inércia.

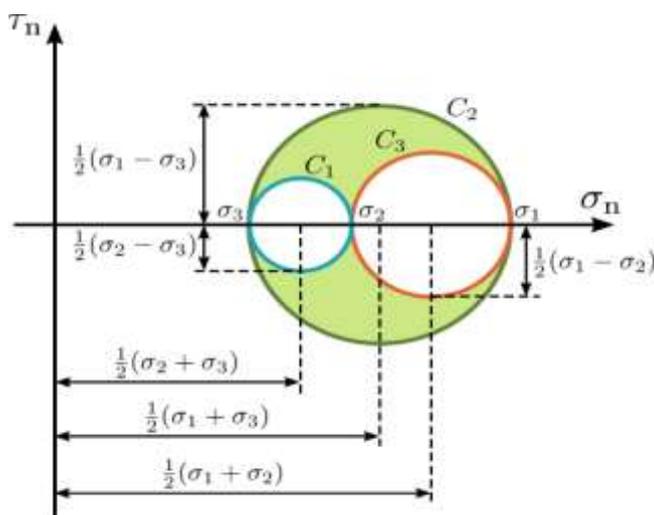


Figura 15 – Círculo de Mohr [33]

O tensor de Cauchy é usado para a análise de tensões de corpos materiais submetidos a pequenas deformações: é um conceito central da teoria da elasticidade linear. Para grandes deformações, também denominado teoria das deformações finitas, outras medidas de tensão são necessárias, tais como o tensor de Piola–Kirchhoff, o tensor de Biot e o tensor de Kirchhoff.

De acordo com o princípio da conservação do momento linear, se o corpo contínuo está em equilíbrio estático pode ser demonstrado que as componentes do tensor de Cauchy em todo ponto material do corpo satisfaz as equações de equilíbrio (equações de movimento de Cauchy para aceleração nula).

Ao mesmo tempo, de acordo com o princípio da conservação do momento angular, o equilíbrio requer que a soma dos momentos em relação a um ponto arbitrário seja nula, o que leva à conclusão de que o tensor tensão é simétrico, havendo assim somente seis componentes independentes de tensão, ao invés das nove originais.

Há alguns invariantes associados com o tensor, cujos valores não dependem do sistema de coordenadas usado ou da área do elemento sobre a qual o tensor atua. Estes são os três autovalores do tensor, que são denominados tensões principais.

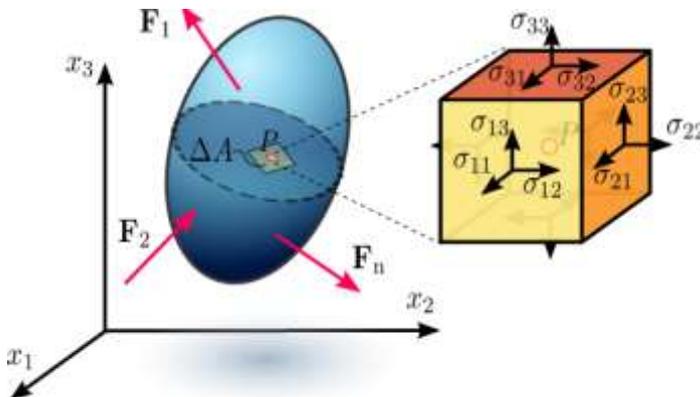


Figura 16 – Tensor de Cauchy [33]

2.3.3

Concentração de Tensão

Uma concentração de tensões é um local em um corpo onde tensões são concentradas (elevadas). Um objeto é mais resistente quando as forças por eles

transmitidas são uniformemente distribuídas sobre sua área, e assim uma redução de área, causada por uma trinca, resulta em um aumento localizado de tensões.

Um material pode falhar, ocorrendo uma propagação de trincas, quando uma tensão concentrada excede a resistência de coesão teórica do material. A resistência à fratura real de um material é sempre menor que o valor teórico porque a maioria dos materiais contém pequenas trincas ou contaminantes que concentram tensões.

Descontinuidades geométricas causam aumentos localizados na intensidade do campo de tensões. Cantos vivos, furos e mudanças da área da seção transversal de corpos submetidos a ações externas são exemplos de concentração de tensões.

Elevadas tensões locais podem causar a falha dos materiais. Portanto, devemos projetar a geometria de modo a minimizar concentração de tensões.

2.3.4

Fator de concentração de tensão para trincas elípticas

A tensão máxima que ocorre nas imediações de uma trinca surge na região próxima ao menor raio de curvatura. O desenho abaixo esquematiza uma trinca elíptica de comprimento $2a$ e largura $2b$ e o raio ρ de arredondamento na ponta da elipse.

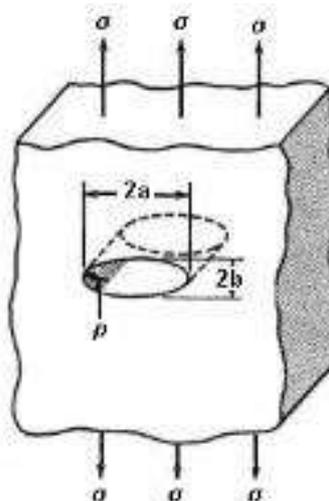


Figura 16A – Parâmetros da geometria de uma trinca elíptica ideal.

O concentrador de tensão K_t tensão na extremidade do eixo maior, é dado por:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (11A)$$

Um "fator de concentração de tensões" é a relação entre a maior tensão (σ_{max}) e uma tensão de referência (σ) da seção transversal bruta. Quando o raio de curvatura tende a zero, a tensão máxima converge para o infinito. Notar que o fator de concentração de tensões é uma função da geometria da trinca, e não de seu tamanho.

2.4

O Ensaio de Tração

Um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais usados é executado sobre carga de tração.

O ensaio de tração consiste na aplicação gradativa de carga de tração uniaxial nas extremidades de um corpo de prova especificado, conforme mostra a

Figura:

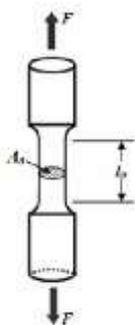


Figura 17 – Desenho esquemático de um corpo de prova submetido à carga de tração.

Tensão é definida genericamente como a resistência interna de uma força externa aplicada sobre um corpo, por unidade de área.

Deformação é definida como a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando submetido a um esforço qualquer.

Se uma carga é estática ou se ela se altera de maneira relativamente lenta com o tempo, e é aplicada uniformemente sobre uma seção reta ou superfície de um componente, o comportamento mecânico pode ser verificado mediante ensaios de tensão–deformação, os quais são normalmente realizados para metais à temperatura ambiente. Neste tipo de ensaio mede-se a variação no comprimento (l) como função da carga (F) aplicada.

O ensaio de tração é padronizado por normas técnicas, entre elas a NBR-6152 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, e a ASTM E 8M da *American Society for Testing and Materials* – ASTM, ambas para materiais metálicos.

O resultado de um ensaio de tração é registrado na forma de um gráfico ou diagrama relacionando a carga em função do alongamento. Como as características carga deformação são dependentes do tamanho da amostra (quanto maior a área da seção reta do corpo de prova, maior a carga para produzir o mesmo alongamento), utiliza-se a normalização da carga e do alongamento de acordo com os seus parâmetros de tensão de engenharia e deformação de engenharia, para minimizar os fatores geométricos.

O ensaio de tração pode ser utilizado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais de grande importância em projetos de máquinas e equipamentos mecânicos; é também bastante utilizado como teste para o controle das especificações da matéria-prima fornecida.

Sua ampla utilização na indústria de componentes mecânicos deve-se à vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais, como: limite de resistência à tração (σ_u), limite de escoamento (σ_e), módulo de elasticidade (E), módulo de resiliência (U_r), módulo de tenacidade (U_t), ductilidade ($AL\%$ ou $AS\%$), coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (k).

2.5

O Ensaio de Impacto

Durante a Segunda Guerra Mundial, o fenômeno da fratura frágil despertou a atenção de projetistas e engenheiros metalúrgicos devido à alta

incidência desse tipo de fratura em estruturas soldadas de aço de navios e tanques de guerra.

Alguns navios (Série *Liberty* - EUA) partiam-se ao meio, mesmo que não estivessem em mar aberto e turbulento, apesar de serem construídos de aços-liga que apresentavam razoável ductilidade, conforme ensaios de tração realizados à temperatura ambiente.

A incidência desse tipo de fratura ocorria nos meses de inverno, e problemas semelhantes já haviam sido relatados em linhas de tubulações de petróleo, vasos de pressão e pontes de estrutura metálica.

Todos esses problemas motivaram a implantação de programas de pesquisas que determinassem as causas dessas falhas em serviço e indicassem providências para impedir futuras ocorrências.

2.5.1

Tipos de ensaios de impacto

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico empregado para a análise da fratura frágil de materiais. Este ensaio é largamente utilizado nas indústrias naval e bélica e, em particular, nas construções que deverão suportar baixas temperaturas.

O resultado do ensaio é representado por uma medida da energia absorvida pelo corpo de prova, não fornecendo indicações seguras sobre o comportamento de toda uma estrutura em condições de serviço. Entretanto, permite a observação de diferenças de comportamento entre materiais, as quais não são observadas em um ensaio de tração.

Os tipos padronizados de ensaios de impacto mais amplamente utilizados são: Charpy e Izod. Em ambos, o corpo de prova tem o formato de uma barra de seção transversal quadrada, na qual é usinado um entalhe.

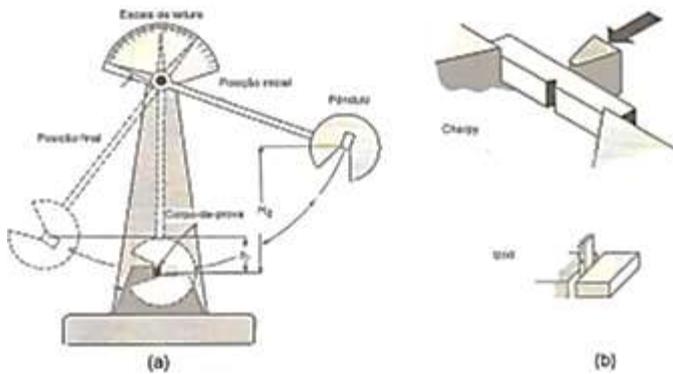


Figura 18 – Máquina para ensaio de impacto e os dois tipos de ensaios Charpy e Izod

2.6

Ensaio de dureza

A dureza é a resistência que um material apresenta ao risco ou a formação de uma marca permanente, quando pressionado por outro material ou marcadores padronizados.

Os métodos mais aplicados em engenharia utilizam penetradores com formatos padronizados e que são pressionados na superfície do material sob condições específicas de pré-carga e carga, causando inicialmente deformação elástica e em seguida deformação plástica.

A área da marca superficial formada ou a sua profundidade (dependendo do tipo de dureza) são medidas e correlacionadas com um valor numérico que representa a dureza do material. Esta correlação é baseada na tensão de que o penetrador necessita para vencer a resistência da superfície do material.

Portanto, o ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca na superfície da peça pela aplicação de pressão com uma ponta de penetração. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, tratamentos superficiais, vidros e laminados, devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência à deformação permanente das peças produzidas.

Existem vários tipos de ensaios de dureza: dureza por risco, dureza por rebote e dureza por penetração sendo esta última a utilizada neste trabalho.

2.6.1

Dureza Rockwell

Proposto pelas indústrias Rockwell, dos Estados Unidos, por volta de 1922, atualmente é o método mais utilizado internacionalmente. É baseado na profundidade de impressão causada por um penetrador sob a ação de uma carga como indicador da medida de dureza.

Existem dois tipos de dureza Rockwell, a comum e a superficial, dependendo do penetrador e das pré-carga e carga utilizadas.

A pré-carga é necessária para eliminar a ação de eventuais defeitos superficiais e ajudar na fixação da amostra no suporte da máquina, bem como causar pequena deformação permanente, eliminando erros consequentes da deformação elástica.

Foi observado que três fatores principais contribuem para o surgimento da fratura frágil em materiais que são normalmente dúcteis à temperatura ambiente: a existência de um estado triaxial de tensões, as baixas temperaturas e a taxa de deformação elevada. Esses três fatores não precisam necessariamente atuar ao mesmo tempo para produzir a fratura frágil.

Estados triaxiais de tensão que ocorrem em entalhes, juntamente com baixas temperaturas, foram responsáveis por muitas situações de fratura frágil em serviço; entretanto, como esses efeitos são acentuados sobre altas taxas de aplicação de carga, diversos tipos de ensaios de impacto passaram a ser usados na determinação da susceptibilidade de materiais à fratura frágil.

2.7

Microestrutura dos Aços

A microestrutura de um material compreende as características físicas que podem ser observadas utilizando-se o microscópio. Um microscópio óptico de boa qualidade pode produzir um aumento de 1000 x. Um microscópio eletrônico moderno pode ampliar uma imagem 1.500.000 x ou mais. Conseqüentemente, uma microestrutura pode ser observada na ordem de nm (nanômetros).

Muitas características estruturais que governam as propriedades dos aços podem assim, ser observadas tais como o tamanho e o contorno de grãos, que estão presentes na microestrutura.

A microestrutura dos aços depende da composição química e dos tratamentos térmicos e mecânicos aos quais o metal foi submetido.

No caso da composição química é possível determinar os componentes que fazem parte da liga. Porém, no caso dos tratamentos térmicos, isso já não é possível. Porém, sabemos que existe um relação entre as propriedades químicas dos componentes da liga, o processamento (tratamento térmico e/ou mecânico) e a microestrutura. [30]



Figura 18A – parâmetros que influenciam uma microestrutura

2.7.1

Microestrutura e Fases

A microestrutura de um material compreende tipicamente as diferentes fases de um material e a forma como elas se arranjam. Como exemplo podemos observar as fases do ferro em função das faixas de temperatura como se segue:

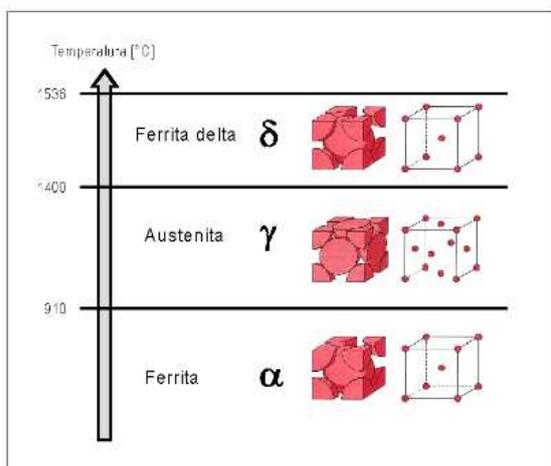


Figura 18B – Organização dos átomos de ferro em função da temperatura

Observa-se que a nível atômico os átomos dos metais em estado sólido se organizam em uma rede cristalina. As ligas metálicas ocorrem por substituição de parte dos átomos desta rede e/ou, pela difusão de outros componentes químicos para o interior da mesma.

Contudo, há um valor máximo de solubilidade destes componentes químicos dentro da rede cristalina, para cada componente químico acrescido na liga. Como por exemplo, citamos o diagrama ferro x carbono conforme abaixo:

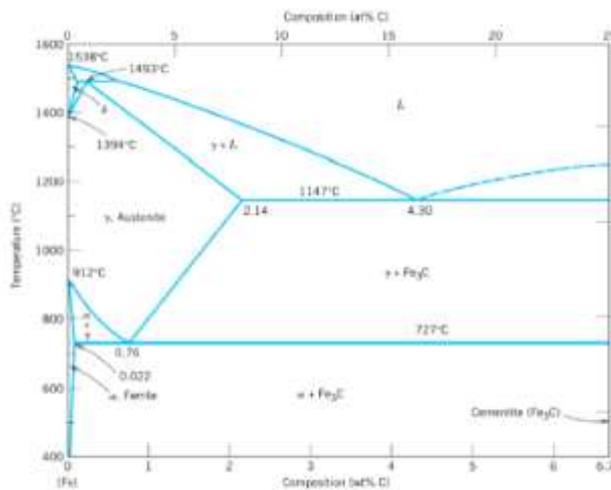


Figura 18C – Diagrama ferro x carbono

No caso da liga ferro x carbono o limite é 6,7% onde neste caso, a rede cristalina do ferro fica saturada de carbono se tornando bastante dura e frágil. É o caso dos aços com alto teor de carbono mais conhecidos como ferro-fundidos.

Como podemos observar no gráfico temperatura x o %wt de carbono, ficam definidas as regiões onde se formam as microestruturas ferrítica, austenítica, perlítica e cementítica. Estas microestruturas quando manipuladas através de tratamento térmico dão origem a outras como por exemplo a martensita.[30]

2.7.2

Martensita

Quando da fabricação dos aços, a Martensita é uma fase chamada metaestável que é composta de ferro que está supersaturado de carbono que é o produto de uma transformação sem difusão (atérmica) da austenita.

A martensita é formada quando ligas de ferro-carbono austenizadas são resfriadas rapidamente ou bruscamente (têmpera). É uma estrutura monofásica (TCC) tetragonal de corpo centrado e se encontra fora de equilíbrio resultado de uma transformação sem difusão da austenita.

A dureza da martensita depende do teor de carbono dos elementos de liga do aço. Quanto maior for o teor de carbono mais dureza terá a martensita. Os elementos de liga determinam a temperabilidade ou, seja, a velocidade de resfriamento necessária, a partir da temperatura de austenização, para que toda a austenita se transforme em martensita.

A martensita no estado pós-tempera, praticamente não é utilizada. É necessário a aplicação de um tratamento térmico posterior que é o revenimento, cuja finalidade é aliviar as tensões geradas pela formação da martensita. Além disso, o revenimento permite reduzir a dureza do material para valores de projeto.[31]



Figura 18D – Microestrutura martensita

2.8

Fadiga

As primeiras observações do fenômeno de fadiga datam do ano de 1829, quando Wilhelm August Julius Albert publicou resultados de testes realizados em correntes de ferro submetidas a carregamentos cíclicos. No período de 1852 a 1869, em Berlim, August Wöhler estudou a ruptura de eixos ferroviários.

A ocorrência destas falhas era imprevisível para os engenheiros da época. Vários eixos fraturavam após apenas algumas centenas de quilômetros de serviço

e, embora projetados de acordo com critérios de resistência estática, essa fratura ocorria sob condições de carregamento normal.

Apesar de ensaios de tração realizados no material antes da entrada em serviço revelarem adequada ductilidade, a ruptura em serviço não apresentava sinais de deformação plástica. Ainda, estes mesmos ensaios realizados no material após a fratura apresentavam as características de ductilidade iniciais. O nome fadiga se deve ao fato do mecanismo deste fenômeno ser desconhecido na época, daí então se dizia que o material "cansava" ou "fadigava".

A Fadiga mecânica é o fenômeno de ruptura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação. O estudo do fenômeno é de importância para o projeto de máquinas e estruturas, uma vez que a grande maioria das falhas em serviço (cerca de 95%) são causadas pelo processo de fadiga.[33]

2.8.1

Curva S-N

O desempenho de materiais em fadiga normalmente é caracterizado pela "curva S-N", também conhecida como "curva de Wöhler", que é um gráfico de magnitude de tensão (S) por número de ciclos (N) em escala logarítmica.[33].

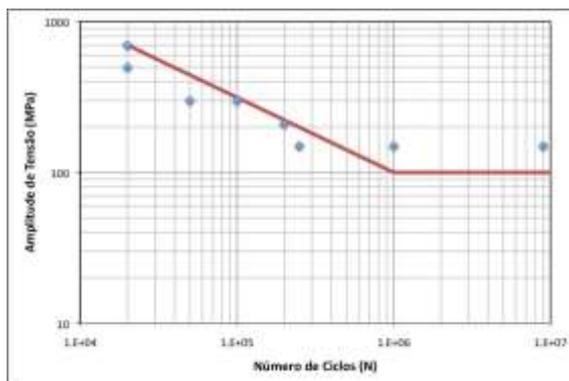


Figura 18E – Curva S-N típica [33]

2.8.2

UHCF – Fadiga de Ultra Alto Ciclo

A fadiga é uma causa frequente de falhas inesperadas de componentes de máquinas e construções. A vida até a fadiga é uma característica importante de

todos os componentes de engenharia e é medido por um número de ciclos que ele pode suportar antes de falhar por fadiga. Resultados dos dados de fadiga são muito importantes especialmente para a segurança, fiabilidade, meio ambiente e do ponto de vista econômico.

O conceito de fadiga pode ser sub-dividido em três categorias: fadiga de baixo ciclo (LCF) – até $N = 10^5$ ciclos até a falha, fadiga de alto ciclo (HCF) - entre $N = 10^5$ e $N = 10^7$ ciclos até a falha e fadiga de ultra alto ciclo (UHCF) - sobre $N = 10^7$ ciclos até a falhar.

Hoje em dia a UHCF (fadiga gigacycle) constitui um dos principais critérios de concepção para uma série de aplicações, por exemplo: os discos de turbina a gás ($N = 10^{10}$ ciclos), cabeçotes de motor de carro e blocos ($n = 10^8$ ciclos), rolamentos de esferas de alta frequência, máquinas de perfuração, motores a diesel de embarcações e trens de alta velocidade ($n = 10^9$ ciclos), etc.

Pesquisa de comportamento da fadiga dos materiais na região do UHCF tem sido intensivas nas últimas duas décadas, principalmente com o uso de máquinas de teste de carga de alta frequência ($f \approx 20$ kHz), para que haja uma maior quantidade de dados de fadiga disponível sob a forma de curvas $S - N$. [34]

2.8.3

UHCF – Efeito da Frequência

A fim de realizar testes de longa vida em valores práticos de tempo, eles devem ser executados em altas frequências (na faixa de kHz). Por exemplo, um teste de até 10^{10} ciclos exigiria quase 16 anos a 20 Hz, mas apenas seis dias a 20 kHz. Máquinas de ultrassom têm sido construídas, o que permite testes a altas frequências na gama de kHz .

Alguns resultados parecem indicar que a frequência tem um efeito significativo sobre os resultados dos ensaios de fadiga. Com o aumento da frequência, ocorre também a elevação da temperatura e para os metais, essa elevação de temperatura abrevia a vida dos componentes em fadiga. [35]