

TECNOLOGIA

NAVAL

2004 - 2005

Parte - I

**Tecnologia Naval e Comportamento dos
Materiais no Meio Ambiente**

1 Introdução ao estudo dos Materiais

1.1 Razões do Estudo dos Materiais na Engenharia Naval

A Engenharia Naval é essencialmente um ramo de Engenharia onde a par de determinados conhecimentos e técnicas específicas, se sintetizam outras, inerentes aos diversos ramos básicos da Ciência e da Tecnologia. Como consequência, os materiais empregues são muito diversificados, compreendendo um grupo de materiais de utilização confinada a aplicações em navios e outras plataformas oceânicas, a par de materiais de utilização corrente.

O estudo aplicado dos materiais, englobando os requisitos de utilização, os limites de aplicação e os critérios de selecção com ênfase especial no seu comportamento mecânico e na sua resistência à deterioração por corrosão no ambiente marítimo, justifica-se para qualquer das variantes da profissão de Engenheiro Naval, enquanto tal. Deve também fazer-se o estudo dos materiais do ponto de vista da tecnologia de fabrico, isto é, relacionando os processos tecnológicos de alteração de forma e de alteração de propriedade, correntes na construção naval e indústrias conexas, com os materiais disponíveis.

Assim, enquanto o Projectista e o Engenheiro de Estaleiro necessitam de conhecer os materiais correntemente usados e os que se encontram em desenvolvimento, para os especificar e seleccionar, o Especialista em Estruturas necessita de compreender o comportamento mecânico e características de fiabilidade dos diversos materiais, o Consultor Técnico do Armador e o Perito necessitam de uma preparação específica no que se refere à inspecção estrutural, à análise de falhas e às soluções de reparação.

1.2 Relação entre a concepção das Estruturas e a sua Segurança e os Materiais com as suas Características e o seu Comportamento

As Estruturas Navais são concebidas satisfazendo determinados requisitos funcionais ou operacionais. Utilizam-se critérios de dimensionamento correspondentes a modelos de comportamento tanto quanto possível análogos às estruturas reais. Estes critérios de dimensionamento são baseados no comportamento mecânico, previsão de deterioração, e demais propriedades dos materiais a utilizar. As incertezas nos carregamentos e no valor das propriedades dos materiais obrigam à utilização de factores de segurança tendentes a obstar a falhas intempestivas.

O correcto conhecimento das características dos materiais a par do desenvolvimento dos métodos de cálculo, permitem uma maior eficiência e racionalidade na aplicação desses materiais, bem como permitem o desenvolvimento e evolução das estruturas e vice-versa, isto é, a necessidade de determinadas soluções estruturais acelera o desenvolvimento das materiais.

Quanto maior for o desconhecimento dos materiais e do seu comportamento, maior terá de ser o factor de segurança, logo mais dispendiosa será a estrutura.

O sistema APLICAÇÃO- ESTRUTURA compreende um ciclo integrado e dependente de acções e funções que estão esquematizados na **Figura 1**.

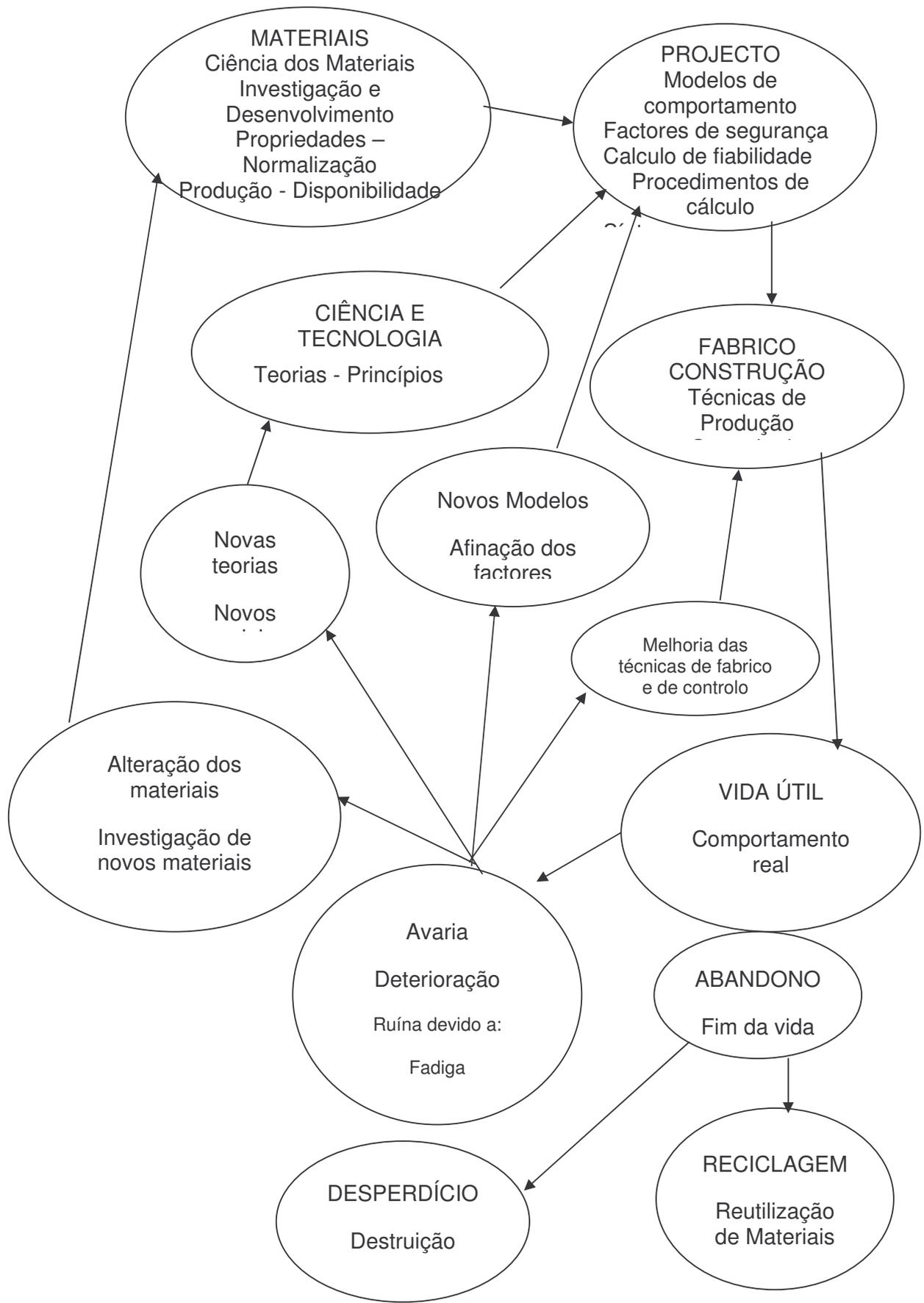


Figura 1 Ciclo de estudo dos materiais e seu relacionamento com as estruturas, as solicitações e o ambiente e a tecnologia de fabrico

<p>OS MODELOS DE COMPORTAMENTO PREVÊM ESTRUTURAS IDEAIS COM MATERIAIS REAIS</p>	<p>AS ESTRUTURAS REAIS SÃO CONSTRUÍDAS COM MATERIAIS REAIS</p>
<p>O MATERIAL IDEAL É: CONTÍNUO SEM DEFEITOS HOMOGENEO FORMA PERFEITA ISOTRÓPICO SEM TENSÕES INICIAIS</p>	<p>O MATERIAL REAL É: DESCONTÍNUO COM DEFEITOS NÃO HOMOGENEO FORMA IMPERFEITA ANISOTRÓPICO COM TENSÕES INICIAIS</p>

A ESTRUTURA MARÍTIMA OPERA EM CONDIÇÕES HOSTIS

ISOLAMENTO FÍSICO

SOLICITAÇÕES ELEVADAS E ALEATÓRIAS

(VENTO- ONDULAÇÃO - GELO)

UMA DEFICIENTE ESCOLHA E APLICAÇÃO DE MATERIAIS A PAR DE UM PROJECTO INADEQUADO, UM FABRICO DE QUALIDADE INSUFICIENTE E UMA UTILIZAÇÃO DESCUIDADA PODE CONDUZIR A AVARIAS, FALTA DE CUMPRIMENTO DE MISSÕES E RUINA COM PERDAS MATERIAIS E HUMANAS

AMBIENTE CORROSIVO

Figura 2 Factores fundamentais para aplicação dos materiais em engenharia naval

1.3 Critérios de Selecção dos Materiais

No projecto, a escolha do material a adoptar para cada componente, órgão ou elemento é essencial. Havendo disponíveis mais de uma centena de milhar de variedades de materiais, como poderá o projectista fazer uma escolha adequada? O problema é extremamente complexo e só se resolve completamente dispondo de um ficheiro e de um computador de relativamente grande capacidade que através de um programa conveniente possa dar a resposta adequada perguntas que o projecto ponha.

Não é nosso objectivo tratar deste assunto em profundidade, mas apenas dar ideia dos aspectos essenciais e apresentar certos critérios simples de escolha. O projectista em regra não dispõe dos meios poderosos atrás referidos, nem nos casos correntes isso se torna necessário, pois além de ser demasiado caro poderia ser desproporcionado com as exigências e o custo do próprio projecto.

A escolha dos materiais tem de ser compatível com o processo de fabrico pois nem todos os materiais se adaptam a qualquer processo; por exemplo, há certos materiais que não se prestam a ser laminados, como sejam o bronze e o ferro fundido; outros não se prestam a ser soldados, colados ou forjados. Por isso a escolha dos materiais depende das aplicações a que os órgãos se destinam, das condições de funcionamento a que estão submetidos e das propriedades que se lhes exige; para que os materiais correspondam a essas exigências devem aqueles possuir as propriedades convenientes conforme referiremos em seguida.

De um modo geral é imperativo que o projectista, ao escolher o material, o especifique correctamente, o que normalmente é feito através de normas nacionais, estrangeiras ou internacionais, ou na sua falta através de definição das características essenciais.

Os factores a ter em conta na escolha e selecção dos materiais a utilizar são variados.

Citaremos os de maior relevância:

- a. Requisitos de utilização e de desempenho
- b. Aspectos económicos - disponibilidade e custo
- c. Existência de Tecnologia - mão-de-obra e equipamento de fabrico
- d. Propriedades dos materiais

A variedade de aplicações em Engenharia Naval, desde a construção de super-petroleiros, à construção de embarcações de pesca para países em desenvolvimento, passando por construções sofisticadas de navios de transporte de produtos químicos, submarinos, aero barcos, etc., dá uma ideia da diversidade de materiais a usar e da necessidade de especialização que o engenheiro naval deve possuir para atingir desejáveis níveis de qualificação técnica.

Em secções subsequentes desenvolveremos os aspectos relacionados com os requisitos de utilização e com as propriedades dos materiais, abordando agora aspectos mais genéricos e com menor profundidade, no que se refere a disponibilidade de materiais mão-de-obra, custo e tecnologia de fabrico.

Para se considerar a utilização dum material, é preciso que ele exista no mercado sob forma comercialmente disponível; sendo um factor que parece óbvio, tem facetas complexas que merecem ser analisadas. Com efeito, um material pode existir numa dada época, ou num dado país e não estar disponível noutra época ou noutra país. As razões são variadas: o material pode-se ter esgotado; a procura ser tão grande que os prazos de entrega sejam exageradamente longos que se tornam incompatíveis com os prazos impostos ao fabrico; a procura ser tão reduzida e o seu fabrico ser económico em determinadas quantidades, conduzindo a produções sazonais também incompatíveis com os prazos do projecto; razões económicas, que obriguem os países a não importar determinados produtos em favor de outros de que eles próprios

disponham ou de outros provenientes de origens de mais fácil acesso, como seja o caso de certos produtos estratégicos; essas situações agudizam-se normalmente em períodos de guerra ou em períodos em que a política e a economia limitam os técnicos nas suas opções. O custo é, a seguir à disponibilidade, o factor de maior relevância entre os critérios de escolha; se atendermos que o custo das matérias primas e dos acessórios a incorporar num dado equipamento influi no seu preço final entre limites muito variados mas que poderemos situar de uma forma aproximada entre 25% e 75% é fácil de compreender a sua relevância no projecto. Deve salientar-se que estes dois factores que acabamos de referir variam extraordinariamente no tempo, pelo que o projectista tem de dispor de um conjunto de informações actualizadas para proceder a uma escolha criteriosa; em função das exigências do projecto haverá naturalmente que conhecer não só o custo por unidade de massa, como o custo por unidade de volume, ou qualquer outro custo unitário.

A possibilidade de dispor ou não de mão-de-obra e tecnologia adequada às transformações das matérias primas e ao fabrico das estruturas e demais elementos, deve ser seriamente considerada. Também neste caso o local de fabrico é fundamental e deve ser tomado em conta. Tecnologias dominadas em países industrializados, como maquinagens, soldaduras e fundições de ligas metálicas e processamento de materiais compósitos podem não ser exequíveis, sem investimentos massivos, nos países em desenvolvimento ou de menor nível de industrialização.

A tecnologia de Construção Naval em materiais metálicos, primordialmente em aço e secundariamente em ligas de alumínio, requer a necessidade de efectuar cortes mecânicos e térmicos, de conformar chapas, perfis e tubos, com recurso a prensas, quinadeiras, calandras, etc., e de unir componentes metálicos por uniões mecânicas e sobretudo por soldaduras. A aplicação destas técnicas reveste-se de diversos níveis de qualidade e dificuldade, relacionadas com o tipo de estrutura.

A tecnologia de construção em madeira, plásticos, materiais compósitos, etc., também varia com o tipo de estrutura e respectiva aplicação.

1.4 Processo de escolha dos materiais

a. Análise da aplicação dos materiais.

Esta análise requer o estudo dos requisitos de desempenho incluindo aspectos funcionais, atributos físicos e condições de aplicação.

b. Correspondência entre os requisitos de aplicação dos materiais e as propriedades dos materiais.

Em alguns casos é relativamente fácil fazer esta correspondência; como exemplo referem-se aplicações onde os materiais estão sujeitos a esforços unidireccionais que podem ser comparados com a resistência à tracção (ou compressão).

Na maioria das situações as condições de serviço não tem uma correspondência directa e simples, obrigando a cálculos, simulações ou ensaios de modelos matemáticos ou físicos, tanto quanto possível idênticos à realidade.

c. Escolha dos materiais potencialmente utilizáveis

Quando as propriedades relevantes estão definidas procura-se em seguida o material ou materiais que melhor satisfazem essas propriedades.

Embora a busca pudesse abranger todo o universo de materiais, um mínimo de conhecimento e realismo elimina algumas classes de materiais, reduzindo a escolha a uma quantidade reduzida de materiais com efectivas potencialidades de satisfazer o pretendido.

Em situações convencionais é vulgar partir de materiais conhecidos para a aplicação e analisar comparativamente outros materiais potencialmente utilizáveis.

Em situações onde se fazem aplicações especiais, de elevadas exigências ou onde não existe experiência adequada, haverá que fazer uma procura sistemática ou eventualmente desenvolver materiais especificamente para a aplicação em estudo.

d. Avaliação dos materiais potencialmente adequados

Na fase de avaliação os materiais potencialmente aplicáveis são sujeitos a uma ponderação das respectivas aptidões - disponibilidade, propriedades, aptidão para o fabrico, custo, etc., correspondendo a escolha à selecção do que melhor satisfaz o objectivo.

e. Objectivação do processo de escolha

Para responder à necessidade de tornar a escolha objectiva adoptam-se métodos quantitativos, de entre os quais se menciona o seguinte:

Identificam-se as características essenciais que o material deve possuir face à aplicação.

Identificam-se as propriedades e outros factores que o material deve satisfazer.

Relativamente às primeiras verifica-se se o material considerado as satisfaz ou não (S/N); relativamente às segundas, as diversas propriedades e outros factores são graduadas numa escala (por exemplo de 1 a 5, de 1 a 4, de 1 a 3, etc.) que reflectirá o mérito relativo das propriedades para a aplicação. Para cada material e cada propriedade, é depois atribuída a graduação na escala considerada.

Como exemplos para componentes mecânicos podemos referir as seguintes características essenciais: resistência à corrosão, soldabilidade, aptidão para a brazagem. Como propriedades a graduar, numa escala convencional podem-se referir: resistência à tracção, tenacidade, rigidez, estabilidade dimensional, resistência à fadiga, resistência à tracção após soldadura e tensões térmicas. Referiremos ainda o factor custo que é obviamente importante.

Se definirmos o mérito relativo da propriedade ou factor é por M_i e por G_i a graduação na respectiva escala, teremos que a aptidão do material K será medida pelo valor

$$Q_k = \frac{\sum_i M_i \cdot G_i}{\sum_i M_i}$$

Outros processos quantitativos de escolha podem ser utilizados, alguns pondo em maior evidência o custo final do produto: o que, se for considerado um nível predeterminado de qualidade ou de satisfação funcional, pode ser uma adequada medida de mérito.

Termina-se com uma palavra de precaução relativamente ao estabelecimento dos méritos relativos das propriedades exigidas pela aplicação.

1.5 Introdução às Propriedades dos Materiais

Os materiais apresentam determinadas características e comportamentos que os definem, identificam e distinguem dos outros. São as suas propriedades.

De uma forma mais precisa, poderemos dizer que a propriedade se traduz na relação entre as condições de serviço ou aplicações a que o material se sujeita, em termos de absorção de energia, e a sua resposta sob a forma de libertação de energia ou de mudança de estado.

Esta caracterização funcional da propriedade pode ser representada em diagrama, como se indica na figura 4.1.

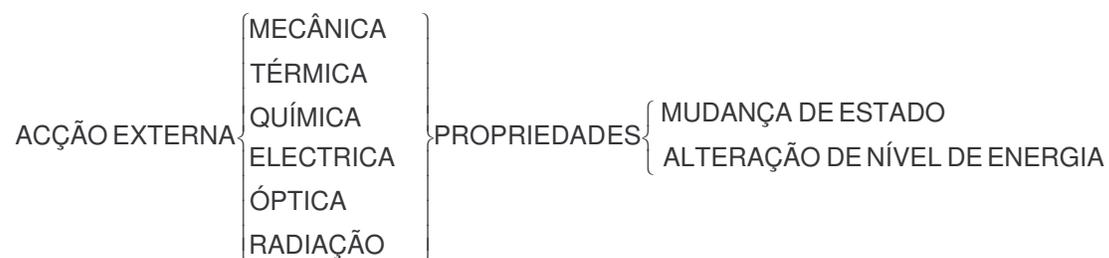


Figura 3 Relação das propriedades dos materiais com a absorção de energia e respectiva resposta em termos de absorção ou dissipação de energia ou de mudança de estado

As variações de energia podem ser qualitativas ou quantitativas, consoante se traduzem na transformação do tipo de energia ou na variação do seu nível. No primeiro caso, teremos como exemplo a conversão de energia eléctrica aplicada a um corpo, em energia calorífica; no segundo caso, poderemos apresentar como exemplo a queda de tensão entre dois pontos de um corpo onde foi aplicada uma corrente eléctrica.

As mudanças de estado podem ser "internas" como por exemplo a variação na composição química e na estrutura cristalina, ou físicas como a variação de tamanho, deformação, ruptura, deterioração, etc.

Das diversas formas de agrupamento das propriedades, podemos distinguir as seguintes:

- Propriedades físicas
- Propriedades químicas
- Propriedades mecânicas

Das *propriedades físicas*, que dependem da estrutura dos materiais e fornecem indicações sobre o seu comportamento quando sujeitos à acção dos campos de forças

físicas, como o campo gravitacional, os campos eléctricos e magnéticos e as variações térmicas, referem-se como exemplo as seguintes:

- Propriedades acústicas
- Densidade (massa volúmica)
- Resistência ao calor
- Condutibilidade térmica
- Dilatação térmica
- Rigidez dieléctrica
- Condutibilidade eléctrica
- Cor, etc.

Das *propriedades químicas*, que dependem da composição químicas, e que dão indicações sobre o comportamento destes elementos quando sujeitos à acção de agentes químicos, pode-se citar a resistência à corrosão electroquímica e a resistência à oxidação a temperaturas elevadas.

As *propriedades mecânicas* indicam como se espera que o material se comporte e qual a sua resistência quando sujeito a diversas solicitações ou à combinação de solicitações de natureza mecânica. Estas propriedades, nalguns casos, são determinadas por métodos normalizados, designados genericamente por ensaios mecânicos, estabelecidos por Associações que se dedicam ao estudo dos materiais, por Institutos de Normalização, etc. Noutros casos, a sua determinação é apenas de natureza qualitativa.

Citam-se em seguida algumas propriedades mecânicas:

Homogeneidade: caracteriza-se pela manutenção das mesmas propriedades em todo o corpo.

Elasticidade: capacidade de um corpo se deformar quando sujeito a uma solicitação, retornando à sua forma e tamanho iniciais, quando essa solicitação cessar.

Isotropia: propriedade de um material que mostra as mesmas propriedades elásticas em todas as direcções.

Plasticidade: propriedade de um material se deformar quando sujeito a uma solicitação externa de um certo valor, continuando a deformar-se sem aparente aumento na solicitação, não retomando à forma e tamanho iniciais quando a solicitação cessar.

Ductilidade: propriedade que permite que o material se deforme plasticamente em tracção sem que ocorra fractura; permite que o material se reduza a fios muito pequenos.

Maleabilidade: propriedade dos materiais que permite que estes sofram grandes deformações plásticas, pela acção de forças externas violentas que actuam em compressão, sem sofrerem rotura.

Dureza: capacidade do material resistir à penetração ou de resistir a ser riscado por outros.

Resistência à Fadiga: capacidade de os materiais resistirem sem se desagregarem à aplicação de esforços variáveis em sentido e intensidade.

Tenacidade: capacidade que os materiais têm de resistir a forças sem se desagregarem; é uma propriedade geral e que mede a capacidade de absorção de energia do material, até à rotura, por acção de esforços normais e (ou) tangenciais.

Resiliência: propriedade que reflecte a capacidade de absorção de energia no domínio elástico.

Resistência à tracção: capacidade dos materiais de resistirem a esforços de tracção, sem se fracturarem.

Como se disse anteriormente, algumas destas propriedades, podem ser objecto de medição, através da definição de parâmetros cujos valores característicos são obtidos em ensaios como os ensaios de tracção, dureza, fadiga, dobragem, resistência, fluência, desgaste, tenacidade à fractura, etc. Esta apreciação quantitativa é de elevado interesse e constituirá a individualização do material do ponto de vista das suas propriedades mecânicas.

Noutras formas de classificação poderemos encontrar outras propriedades importantes, como é o caso das propriedades relacionadas com o fabrico (propriedades tecnológicas), estando neste caso as seguintes:

- aptidão para a fusão (fundição) - a fluidez do material é uma característica importante em peças vazadas e em soldadura.
- aptidão para o forjamento, para a estampagem e embutissagem corrente ou profunda.
- soldabilidade (aptidão para permitir a junção de peças à temperatura de fusão).
- maquinabilidade, por corte ou arranque de aparas.
- aptidão para tratamentos térmicos, mecânicos e termoquímicos.
- aptidão para tratamentos superficiais, etc.

Durante o estudo dos ensaios mecânicos serão aprofundado alguns aspectos relacionados com as propriedades mecânicas mais importantes e a forma de as avaliar.

1.6 Os Requisitos de Utilização e Desempenho em Engenharia Naval

A engenharia de construção naval, ou de uma forma mais geral engenharia oceânica, abrange um vasto conjunto de estruturas e equipamentos. Numa perspectiva evolutiva, verificamos que a construção de navios foi objecto de grande mudança há 100 anos, quando o aço foi introduzido substituindo o ferro e a madeira como materiais estruturais.

Anos passados, novo desenvolvimento significativo ocorreu quando as qualidades dos materiais produzidos e o desenvolvimento da tecnologia da soldadura permitiram a execução de navios, totalmente soldados, sem o risco de ocorrerem roturas frágeis graças ao desenvolvimento dos conceitos da tenacidade à fractura.

Nos últimos trinta anos, muitos novos projectos de navios, satisfazendo avançados conceitos de transporte e de exploração oceânica, que levaram à introdução de navios especializados como porta contentores, transportadores de gás liquefeito, navios de efeito de superfície, estruturas oceânicas móveis e fixas, etc., introduziram a necessidade de obter materiais com características adequadas. Por isso, e entre outros, foram introduzidos em construção naval materiais para serviços a baixa temperatura e materiais com uma elevada taxa de resistência/peso; as estruturas complexas usadas como plataformas oceânicas, requerem uma cuidadosa análise das propriedades dos materiais quando as solicitações de tracção são aplicadas perpendicularmente às superfícies das placas; a construção de navios de grande porte e razões de economia estimularam o uso de processos de fabrico automático; o conceito simples de tenacidade à fractura, que responde aos problemas de fractura frágil em aços ordinários, requerem desenvolvimentos extensivos antes de poder ser aplicado a novos materiais e estruturas; os aspectos de fadiga e corrosão são objecto de maior análise e estudo. Acompanhando todas estas mudanças ocorridas nas últimas décadas, houve uma maior procura de garantia da qualidade e da utilização de ensaios não destrutivos.

Os sistemas de propulsão evoluíram desde a navegação à vela (onde o aparelho motor era essencialmente velas fabricadas de matérias têxteis) passando por robustas instalações térmicas com caldeiras e máquinas alternativas a vapor, até às actuais instalações altamente eficientes, com elevados níveis de controle automático e uma grande diversidade de materiais especiais (metálicos e não metálicos).

Os equipamentos de prestação de serviços e os requisitos de habitabilidade introduziram todo um conjunto de materiais de construção mecânica, de materiais de revestimento e isolamento e outros, que há 30 ou 40 anos eram desconhecidos ou considerados desnecessários.

Para poder compreender e utilizar os materiais disponíveis e as tecnologias do seu processamento, o engenheiro naval, projectista ou não, deve ter conhecimentos de Metalurgia, Tecnologia de Soldadura, Ensaios Não Destrutivos e da Ciência dos Materiais em geral. O conhecimento dos princípios básicos relacionados com estes campos do conhecimento permitem projectos muito mais fiáveis e eficientes, quer no aspecto estrutural, quer no aspecto de aprestamento, através de uma adequada selecção de materiais, técnicas de junção e de maquinagem e através da correcta especificação dos requisitos de segurança e de garantia de qualidade.

Das considerações de natureza geral, que foram feitas, extraem-se alguns aspectos determinantes na utilização e desempenho em engenharia naval:

- Ambiente marítimo é altamente agressivo; essa agressividade revela-se pelo nível e aleatoriedade das solicitações mecânicas (estáticas e dinâmicas) e revela-se pela deterioração dos materiais por corrosão electroquímica.
- O isolamento e auto-suficiência dos navios e outras plataformas oceânicas; neste aspecto, a robustez e a fiabilidade estrutural, a par da resistência ao fogo e da toxicidade dos fumos libertados pelos materiais são determinantes na selecção dos materiais a usar.

1.7 Classificação do materiais, em Engenharia Naval, quanto à aplicação.

Sem prejuízo de processos mais objectivos de classificação das aplicações de materiais em navios, poderemos encontrar 3 grupos bem distintos pelas exigências das propriedades dos materiais a usar:

- materiais estruturais
- materiais para sistemas marítimos
- materiais para isolamento e revestimentos

Para os primeiros considera-se principalmente a utilização de aços, ligas de alumínio, PRFV e madeira; relativamente aos segundos é grande o leque de materiais a considerar, no entanto, os que maior importância apresenta presentemente são as ligas de cobre, os aços ligados, sobretudo os aços inoxidáveis e os materiais específicos para aplicações eléctricas; quanto aos últimos, merecem realce os não metálicos, que a par de características específicas de isolamento térmico, acústico ou antivibratório devem ter resistência ao fogo adequada.

2 PROPRIEDADES MECÂNICAS E ENSAIOS

2.1 ENSAIOS DE TRACÇÃO

2.1.1 Introdução

As propriedades correntemente referidas para cálculos de projecto e para aceitação do material são quantitativamente determinadas pelos ensaios de tracção. Os procedimentos e os provetes utilizados nestes ensaios variam entre os diferentes produtos e são estabelecidos por diversos Institutos, Associações, Sociedades de Classificação, etc.

2.1.2 Limite proporcional e limite elástico

Quando um esforço de tracção é aplicado a um provete, produz uma deformação longitudinal proporcional ao esforço e mensurável entre dois pontos de referência. O valor máximo da tensão de tracção correspondente à referida proporcionalidade, é designado por limite proporcional e à tensão correspondente chama-se tensão limite de proporcionalidade. No caso dos aços de construção naval esta tensão está muito próxima do limite elástico que é a máxima tensão de tracção em que não existe uma deformação permanente após o alívio da tensão aplicada. A constante de proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação, designa-se por módulo de elasticidade.

2.1.3 Ponto de cedência

Quando, durante um ensaio de tracção, se atinge um ponto em que ocorre deformação sem aumento de tensão, este ponto corresponde ao ponto de cedência e a tensão respectiva é a tensão de cedência.

2.1.4 Tensão de prova (tensão convencional)

Nalguns materiais não é possível definir de forma precisa o ponto de cedência e é necessário referir uma tensão correspondente a um determinado valor de deformação permanente (normalmente 0,2% ou também 0,5%). Esta tensão designa-se por tensão de prova a x% ou tensão limite convencional de elasticidade.

2.1.5 Tensão de rotura

Após o início da cedência, à medida que a tensão de tracção aumenta, o material deforma-se, no entanto não existe uma relação de proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação; verifica-se igualmente quando o material deixa de estar sujeito ao esforço de tracção, que ficou com uma deformação permanente.

Esta aplicação de tensão de tracção quando há deformação permanente corresponde ao domínio plástico. Para o mesmo incremento de tensão, à medida que esta aumenta, o incremento de deformação é maior, até que ocorre a rotura do material, separando-se em duas partes; a tensão mais elevada decorrente do ensaio de tracção designa-se por tensão de rotura.

2.1.6 Extensão após rotura

Quando ocorre a rotura, no decurso do ensaio de tracção verifica-se que se no provete se marcou um comprimento de referência l_o , o comprimento de referência (juntando as duas partes do provete) passou a ter um comprimento maior l_u relacionado com a aludida deformação plástica. O quociente $(l_u - l_o)/l_o$ corresponde à extensão após rotura.

2.1.7 Coeficiente de estrição

Após a rotura do provete sujeito ao ensaio de tracção constata-se que houve uma redução de secção na zona de rotura (ou de estrição). Se a área da secção for A_o e a final A_u , define-se como coeficiente de estrição o quociente $(A_o - A_u)/A_o$.

2.1.8 Ensaio de tracção; sumário de procedimentos

(1) Normas genéricas:

Metals - NP 105
Plásticos - NP 1198

(2) Objectivos:

Medir:

- Resistência à tracção (tensão de rotura - σ_r)
- Limite de elasticidade (tensão de cedência - σ_c ; tensão limite convencional de elasticidade - $\sigma_{0.2}$, $\sigma_{0.5}$; tensão limite convencional de proporcionalidade σ_p)
- Alongamento (extensão após rotura - ϵ_r)
- Estrição (coeficiente de estrição - Z)
- Rigidez (módulo de elasticidade - E)

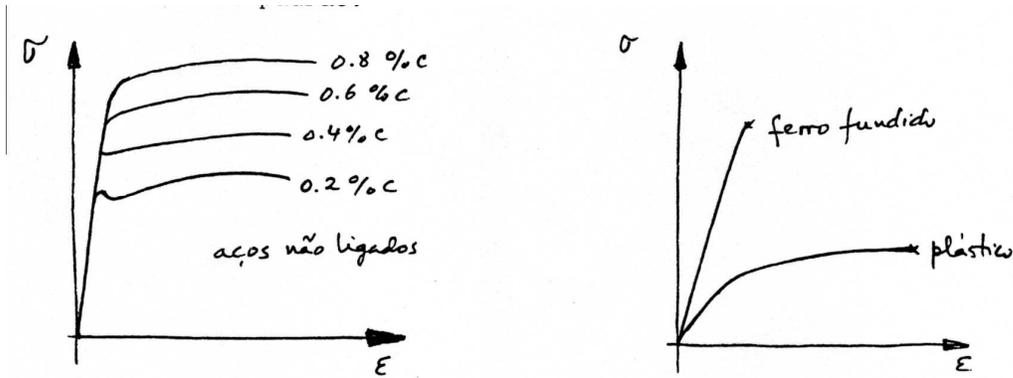
Avaliar:

- Ductilidade ou fragilidade
- Plasticidade
- Elasticidade
- Tenacidade (de forma indirecta)

Os resultados dos ensaios são aleatórios porque o material:

devia ser:	no entanto:
isento de defeitos	tem defeitos
homogéneo	é heterogéneo
isotrópico	é anisotrópico
sem tensões iniciais	tem tensões internas
de forma perfeita	é de forma imperfeita

Os resultados dos ensaios são apresentados com um valor médio, com um determinado desvio padrão.



(3) Módulo de Elasticidade ou de Young

Tangente à recta σ_e na zona elástica na maioria dos metais; secante entre 0 e σ_e ou σ_r em ferros fundidos e alguns não metais.

(4) Rotura

Deformação	Dúctil	Frágil
Modo cristalográfico	Corte	Clivagem
Aparência	Fibrosa	Granular
Brilho	Baço	Brilhante

(5) Dimensões de referência do provete

L_0 - comprimento de referencia inicial

L_u - comprimento de referencia final (na rotura)

Área inicial da secção útil do provete A_0

Área na rotura da secção útil do provete A_u

$$L = K\sqrt{A_0} \quad K = 5.65 \text{ (segundo ISO)}$$

$$\epsilon_r = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad \rightarrow \quad \text{extensão após rotura}$$

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100\% \quad \rightarrow \quad \text{coeficiente de estrição}$$

(6) Unidades de medida adoptadas SI

Forças N KN

Tensões Pa (1MPa \Leftrightarrow 1N/mm²)

(7) Velocidade Máxima do ensaio (segundo a NP 105)

Zona elástica (entre 5Kg/mm^2 e o limite de elasticidade) incremento de tensão inferior a 1Kg/mm/s

Zona plástica: alongamento (extensão) inferior a $25\%/minuto$, medido na zona entre os traços de referência.

(8) Factores que afectam os resultados do ensaio

- Temperatura
- Velocidade do ensaio
- Dimensão do provete e sua precisão
- Acabamento do provete
- Precisão do ensaio
- Orientação do material do provete relativamente à laminagem
- Excentricidade de aplicação da carga
- Colheita de provetes

(9) Como escolher o ensaio

- Selecção do tipo do provete de acordo com a geometria do material (chapa, perfil, etc.)
- Selecção das dimensões do provete em função da máquina disponível e da sua capacidade de carga e de resistência à tracção que se espera que o material tenha.
- Execução do ensaio

Nota: Usam-se normalmente máquinas universais

(10) Diagramas convencional/racional

Ver i. Ensaio de tracção - complementos

(11) Normas

- Metais
- Madeira
- Plásticos

(12) Módulo de resiliência

Capacidade de absorção de energia no domínio elástico

(13) Módulo de tenacidade

Capacidade de absorção de energia sem que ocorra a rotura

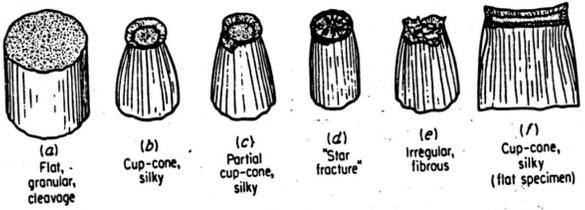
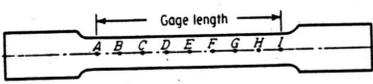
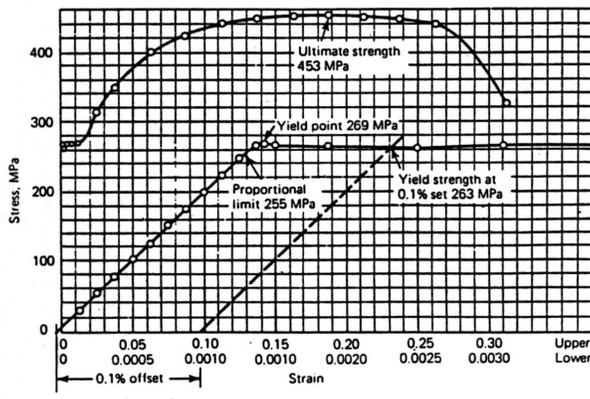
(2 ensaios)

ENSAYO DE T.N.30
TRACCA

TENSION TEST OF METAL - LOG SHEET		Load kN	Deform. mm	Stress MPa	Strain m/m
APPARATUS:		14.5	0.050	29	0.000125
Machine: 250-kN Olsen UTM (No. 12)		27.5	0.100	55	0.000250
Dial extensometer: Federal (No. 61), with multiplier of 2		39.0	0.150	78	0.000375
		52.5	0.200	105	0.000500
		63.0	0.250	126	0.000625
TEST SPEED:		75.5	0.300	151	0.000750
To yield strength: 1.25 mm/min		89.0	0.350	178	0.000875
After yielding: 5.00 mm/min		101.0	0.400	202*	0.001000
SPECIMEN: Mild steel		112.5	0.450	225	0.001125
Mark or ID: 618		124.0	0.500	248	0.001250
Total length: 470 mm		134.0	0.550	268	0.001375
Length between shoulders: 285 mm		134.5	0.576	269	0.001440
Gage length: 200 mm		133.5	0.600	267	0.001500
Number of divisions: 8		133.0	0.752	266	0.001880
Diameter of ends: 32 mm		131.5	1.000	263	0.002500
Diameter of reduced section: 25.23 mm					
OBSERVATIONS:		134.0	1.248	268	0.003120
Elongation in gage length: 62.5 mm		134.0	1.876	268	0.004690
per div.: 5.0, 5.5, 6.2, 8.8, 19.5, 6.7, 5.8, 5.0 mm		134.5	2.500**	269	0.006250
Percent elongation: $100(62.5/200) = 31.25\%$		134.5	2.5	269	0.0125
Percent reduction in area: $100(500-187.5)/500$ $= 62.50\%$		157.5	5.0	315	0.0250
Type of fracture: Three-quarter cup cone, fine-grained in center, silky at edge		175.5	7.5	351	0.0375
Modulus of elasticity: $202 \text{ EG}/1.02 \text{ E-3} = 198 \text{ GPa}$		200.0	12.5	400	0.0625
		212.5	17.5	425	0.0875
		221.0	22.5	442	0.1125
		225.0	27.5	450	0.1375
		226.5	32.5	453	0.1625
		226.5	37.5	453	0.1875
		225.5	42.5	451	0.2125
		224.5	47.5	449	0.2375
		220.5	52.5	441	0.2625
		164.5***	62.5	329	0.3125

Operator: H.D.
Recorder: G.H.
Date: 80-03-21
Temperature: 22°C

* Data used for E
** Extensometer removed
*** Specimen ruptured



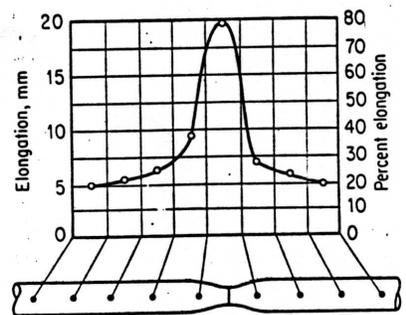
Typical tensile fractures of metals.

Aparência da superfície de fratura (ou de ruptura)

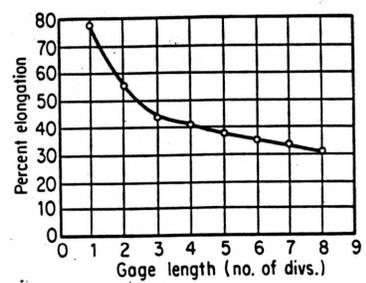
(a) natureza frágil - requêdo plano de clivagem, intergranular
aparência granulosa, brilhante

(b)(c)(f) natureza dúctil - nota-se estiramento - requêdo plano de corte, formam-se cúpulas deformadas devido a mecanismos de encrocamento, aparência fibrosa

(d) e (e) natureza mista dúctil - frágil



(a) Elongation in each division (see fig. 8.18 for values)



(b) Percent elongation vs. gage length

Effect of gage length on percentage of elongation.

Efeito da relação comprimento de referência / diâmetro útil e sobre a distribuição (ϵ_x, ϵ_z) e na resistência à tração

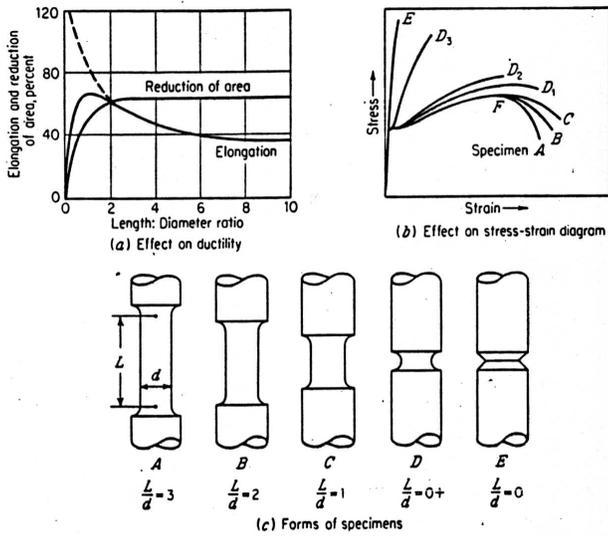
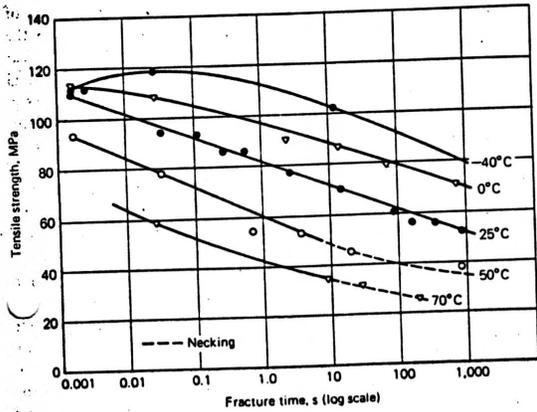
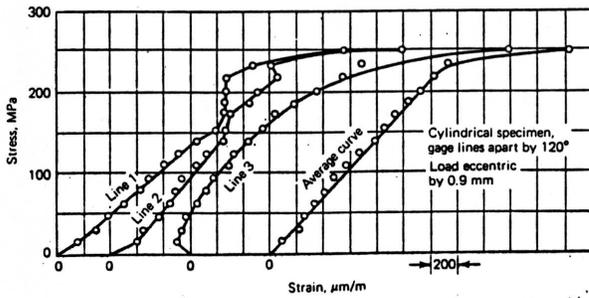


Fig. 8.23. Variation in strength and ductility of steel with length of reduced section. (From Upton, Ref. 97.)



Note: 20 MPa = 2.9 ksi
Strength-time data for PMMA plastic.

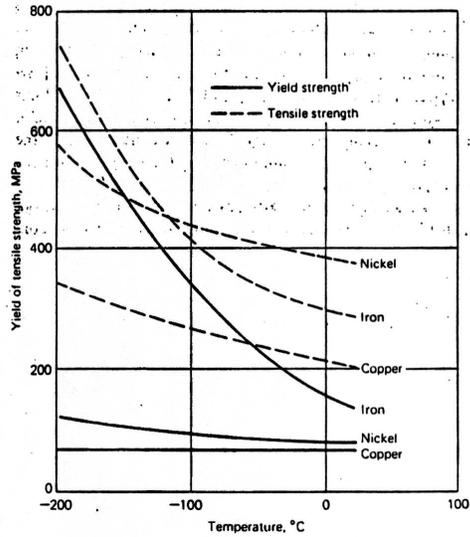


Note: 100 MPa = 14.5 ksi

Figure 8.24 Effect of eccentric load on strains. *Efeito das excentricidades na aplicação de carga*

Efeito das velocidades do ensaio e da temperatura, nos resultados do ensaio de tração (plástico)

Efeito da temperatura nos resultados do ensaio de tração (metais)



Note: 200 MPa = 29 ksi

Variation of yield and tensile strengths of metals with temperature.

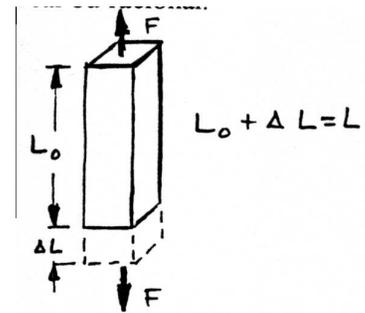
i. Ensaio de tracção complementos

Diferença entre a tensão convencional ou nominal e a tensão real ou racional.

$$\sigma_v = \frac{F}{S} \quad \text{Pressuposto: volume constante} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\sigma_{conv} = \frac{F}{S_0} \quad L_0 S_0 = LS \quad \longrightarrow \quad S = \frac{L_0 S_0}{L}$$

$$\sigma_v = \frac{FL}{L_0 S_0} = \frac{F}{S_0} \cdot \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \longrightarrow \boxed{\sigma_v = \sigma_{conv}(1 + \varepsilon)} \quad (a)$$



Para alongamentos instantâneos considera-se: dL/L

$$\text{a deformação total} \quad \varepsilon_v = \int_{L_0}^{L_0 + \Delta L} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right)$$

$$\boxed{\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon)} \quad (b)$$

As relações (a) e (b) permitem passar do diagrama convencional ao diagrama racional (tensões nominais a tensões reais)

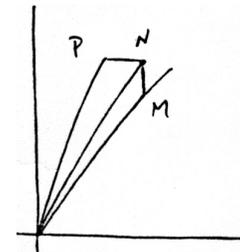
$$\text{Na figura temos:} \quad \overline{MN} = \sigma_v - \sigma_{conv} = \frac{F(1 + \varepsilon)}{S_0} - \frac{F}{S_0} = \frac{F}{S_0} \varepsilon$$

$$\overline{NP} = \varepsilon - \varepsilon_v = \varepsilon - \ln(1 + \varepsilon)$$

O traçado das curvas racionais permite separar dois fenómenos que se confundem no ensaio clássico:

- aumento de resistência à tracção
- enfraquecimento devido à diminuição de secção

σ_v, ε_v valores reais



$\sigma_{conv}, \varepsilon_{conv}$ valores nominais (são os valores normalmente considerados nos ensaios de tracção, onde se assume que a secção transversal se mantém constante).

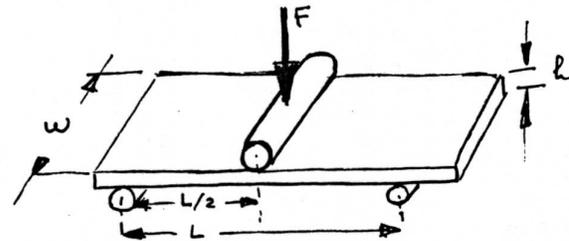
j. Ensaio alternativo ao de tracção

Nos materiais frágeis, particularmente cerâmicos e alguns compósitos o ensaio de tracção normal é difícil de executar porque os resultados são falseados devido a falhas superficiais.

Um processo alternativo de avaliar a resistência à tracção é o ensaio de flexão que mede a resistência à flexão (ou o módulo de rotura).

$$\sigma_{flexão} = \frac{3FL}{2\omega h^2}$$

Na tabela que se segue verifica-se que os materiais frágeis têm uma clara vantagem na resistência à compressão porque nesse caso as falhas superficiais têm tendência a fechar.



Os materiais frágeis são geralmente usados tirando-se partido da resistência à compressão que é relativamente elevada, se comparada com a resistência à tracção

	Tensão de rotura à tracção	Tensão de rotura à compressão	Tensão de rotura à flexão
Poliéster + 50% fibra vidro	160	220	300
Poliéster + 50% tecido de fibra de vidro	255	190	320
Al ₂ O ₃	210	259	345
Si C	170	690	255

Torna-se evidente que os resultados dos ensaios têm de ser comparados entre si, isto é, a avaliação dos materiais é feita comparando propriedades resultando de ensaios iguais

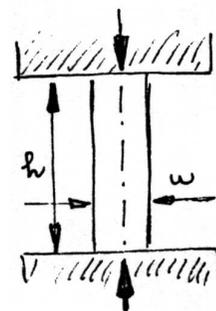
2.2 Ensaio de compressão

Tal como no ensaio de tracção, neste, o provete devidamente dimensionado e preparado é submetido a um carregamento uniaxial, de valor crescente, aplicado até à rotura.

Este ensaio tem aplicação para determinar as características de resistência à compressão de alguns materiais cujas aplicações exigem o conhecimento dessas propriedades; entre esses materiais figuram a madeira e o betão.

Convém referir que o dimensionamento dos componentes estruturais esbeltos (comprimento muito superior às dimensões transversais da secção) sujeitos a esforços de compressão não é determinado pelas propriedades dos materiais à compressão, mas sim pelos mecanismos de instabilidade conhecidos pelos termos de "encurvadura", "enfundamento" ou "varejamento".

Do ponto de vista técnico a execução dos ensaios de compressão é bastante mais complexa e exige máquinas de maior capacidade, relativamente aos ensaios de tracção. Referimos algumas dessas limitações e dificuldades



Para evitar o efeito de varejamento adoptar dimensões tais que $\frac{h}{\omega} < 1.5$. Por este facto as máquinas têm de ter maior capacidade que nos ensaios de tracção.

Dificuldade em aplicar um carregamento verdadeiramente axial, concêntrico e uniforme como consequência, além de erros de leitura pode haver tendência para ocorrer uma certa instabilidade motivada pela existência de tensões de flexão, é recomendável usar provetes cilíndricos em vez de provetes prismáticos.

O carregamento do provete provocará o aumento da respectiva secção transversal que nas superfícies de contacto as faces planas da matriz de aperto da máquina será constringida pela força de atrito que se desenvolve entre as referidas superfícies metálicas

Origina-se o que é conhecido pelo efeito do "barril"



O esboço que se junta apresenta uma sugestão para obviar esta anomalia.

Na generalidade dos materiais não metálicos que são ensaiados, (betão, tijolo, cerâmicos, madeira, etc) a resistência à compressão é superior à resistência à tracção, logo este facto é uma outra razão para o aumento da capacidade das máquinas.

Devido à grande dimensão transversal dos provetes e às já referidas dificuldades, os resultados dos ensaios têm uma maior variabilidade e menor grau de confiança.

As técnicas dos ensaios de compressão estão definidas em normas, geralmente estabelecidas para um determinado material.

Convém referir que enquanto nos ensaios de tracção o diagrama nominal apresenta resultados inferiores ao do diagrama real, devido à redução da secção útil, no ensaio de compressão passa-se o contrário, isto é, o diagrama nominal apresenta valores superiores ao do diagrama real.

2.3 ENSAIO DE DOBRAGEM

2.3.1 INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

O ensaio de dobragem consiste em submeter um provete de secção circular ou poligonal com determinado comprimento a uma dobragem sem inversão do sentido de flexão, de tal modo que o material entre em deformação plástica na zona da dobra.

Para cargas pequenas, o provete encurva ligeiramente sendo esta deformação (deformação elástica por flexão) completamente recuperada ao retirarmos o momento aplicado. Contudo ao incrementar progressivamente este, atingir-se-á a dado ponto um

valor que provoca deformação plástica. Muito embora exista sempre uma recuperação elástica, o provete ficará com uma deformação residual.

Sob o ponto de vista prático, a dobração é feita em redor de punções, verificando-se se existem fissuras na superfície exterior do provete. O critério mais usual, de avaliação do resultado do ensaio é a determinação do ângulo de dobração ao qual corresponde o início das fissuras, podendo a severidade do ensaio ser controlada pelo uso de diferentes punções, em redor dos quais se faz a dobração.

Existem várias razões para realizar o ensaio de dobração estando a maior parte relacionadas com os requisitos de fabrico. Na realidade, estes ensaios oferecem uma boa forma de avaliar a ductilidade, submetendo o material a solicitações análogas às dos processos de conformação plástica.

Podem ainda mais especificamente servir para detectar elevados teores de carbono ou de fósforo, ou para detectar condições impróprias de dobração do aço.

Nalguns casos são feitos ensaios de flexão a quente como é o caso do ferro fundido que é aquecido a cerca de 1000° C e depois dobrado com o objectivo de detectar elevados teores de enxofre.

Ocasionalmente efectua-se um ensaio de peças temperadas como é o caso dos rebites de aço para caldeiras; este ensaio destina-se a determinar elevado teor de carbono.

Também se pode fazer o ensaio de flexão de peças entalhadas, furadas ou punçoadas, destinando-se à rápida detecção de uma estrutura cristalina grosseira e de defeitos internos.

Convém realçar o facto do ensaio de dobração servir apenas como indicação qualitativa da ductilidade do material, não dando valores numéricos sobre as extensões plásticas. Estas podem ser calculadas utilizando os métodos descritos na literatura especializada de plasticidade.

Algumas normas de qualidade de aços exigem a execução de ensaios de dobração como é o caso de varões para o esforço de betão armado, segundo ASTM A 615 M. Como se sabe estes varões são dobrados na obra e daí o interesse em saber a sua ductilidade.

Nos aços estruturais exige-se que a dobração seja feita a 180°

Para o ensaio de flexão de alguns materiais tais como arames (ASTM F 113) e plásticos (ASTM D 747), a American Society for Testing Materials especifica qual o momento e ângulo de dobração a ser observado.

Uma variante do ensaio de dobração é o ensaio de dobração alternada, que também se encontra normalizado. Neste ensaio o provete pode ser colocado entre as garras de um torno de bancada e dobrado alternadamente até se verificar a rotura, registando-se o número de dobragens.

Obviamente será mais dúctil o material que suportar maior número de dobragens. Este ensaio é importante quando o material vai estar sujeito a dobragens sucessivas.

Terminamos este parágrafo referindo que em princípio a chapa ou barra a ensaiar deve ter a mesma espessura da chapa da peça. A acção de dobração leva a que o

alongamento das fibras externas varie directamente com a espessura do provete e inversamente com o raio de curvatura. Assim, para garantir o mesmo efeito de dobragem, provetes de diversas espessuras exigem punções de diferentes diâmetros.

2.3.2 ENSAIO DE DOBRAGEM LIVRE

É fundamentalmente um ensaio pensado para verificar se o material apresenta um mínimo de plasticidade a uma dada temperatura.

Realiza-se numa prensa sobre um provete de tamanho bem definido, que se submete a uma dobragem preliminar antes de se efectuar o ensaio propriamente dito.

O ensaio de dobragem livre é aquele em que se deixa livremente que a curvatura adopte a sua forma natural durante os estados intermédios de dobragem, só se utilizando um raio normalizado nos últimos estados.

No caso do ensaio de dobragem livre o provete não se ajusta ao mandril na zona de dobragem a menos que se utilize uma força lateral para levar o mandril contra a curvatura do metal.

A quantidade de força necessária para este último objectivo depende da rigidez do material, que tende a formar um pico ou seja, a dobrar-se mais agudamente que o raio do mandril, como se pode observar na figura 2.

Por vezes o ensaio é levado a cabo sem mandril de tal forma que o material é levado ao contacto com um ângulo de dobragem também de 180°. Em qualquer dos casos tem lugar um adelgamento na zona de dobragem acompanhado por uma pequena expansão lateral de acordo com a largura, sendo maior o adelgamento quanto mais agudo for o ângulo de dobragem.

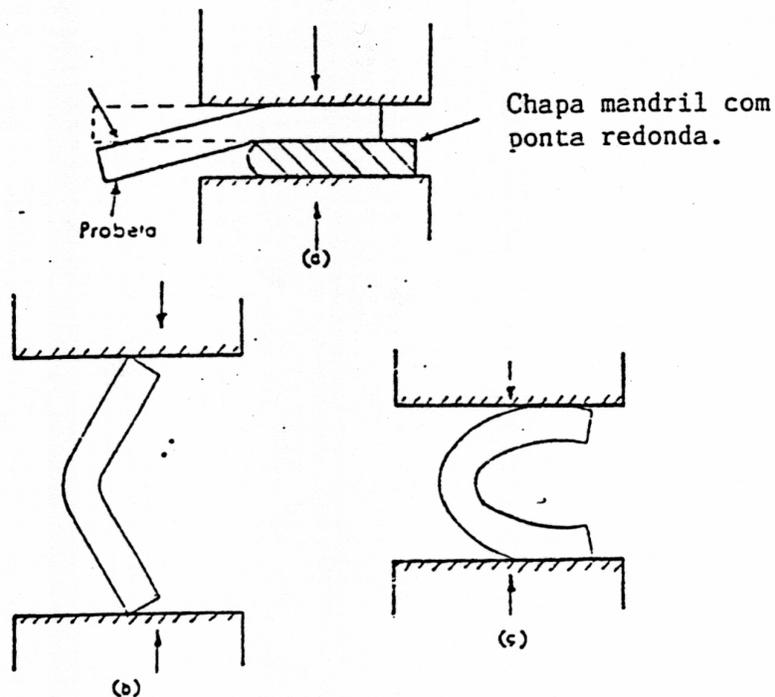


Figura 4 Realização de um ensaio de dobragem livre: a) Dobragem preliminar; b) Primeira etapa intermédia; c) Segunda etapa intermédia

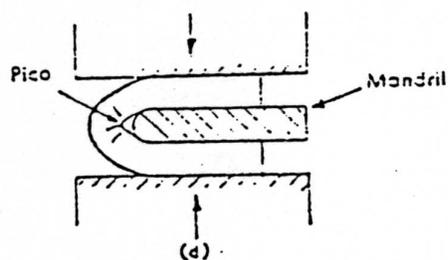


Figura 5 Etapa final do ensaio de dobragem livre

2.3.3 ENSAIO DE DOBRAGEM CONTROLADA

O ensaio de dobragem controlada é aquele onde, como o próprio nome indica, se faz a dobragem de uma forma cuidadosa em torno de um raio determinado previamente.

O ensaio pode ser usado com os seguintes objectivos:

1 - Para determinar a ductilidade.

2 - Para encontrar, para um dado material, o raio de dobragem mínimo para um determinado ângulo de dobragem.

3 - Para saber o ângulo de recuperação elástica num ensaio de dobragem a frio e assim calcular o ângulo necessário para se obter um ângulo permanente de dobragem.

4 - Para saber qual a força requerida nos pontos 2 e 3.

Muito embora possam ser estudadas as condições a quente, o ensaio de dobragem é normalmente um ensaio realizado à temperatura ambiente. No que diz respeito às utilizações atrás referidas somente a primeira requer uma descrição mais pormenorizada porque as outras são requisitos de fabricação empíricos que dependem de circunstâncias locais para detalhes precisos.

A ductilidade pode ser medida obrigando um provete de dimensões normalizadas a dobrar-se em torno de um raio determinado sendo normalmente utilizados para esse fim três rolos, sendo dois fixos e o terceiro móvel, guiado com precisão e que vai provocar a deformação do provete, como se pode observar na figura 3.

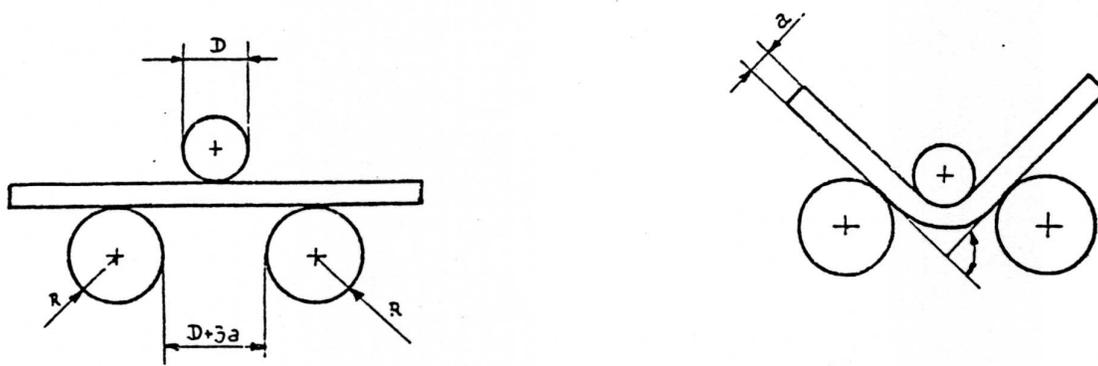


Figura 6 Dobragem controlada sobre rolos

Para a realização do ensaio a superfície exterior é primeiramente assinalada com linhas transversais colocadas a espaçamentos regulares.

Dobra-se então o provete de tal modo que seja possível a observação da superfície exterior até que surjam gretas à superfície. Nessa fase pode então medir e registrar-se o ângulo de dobragem. Pode igualmente ser medido o alongamento da superfície exterior através da medida do espaçamento das referidas linhas em relação ao espaçamento original.

Em alguns casos é omitida a referida marcação sendo apenas medido o ângulo de dobragem.

2.3.4 ENSAIO DE DOBRAGEM EM JUNTAS SOLDADAS

A utilização do ensaio de flexão ou de dobragem em juntas soldadas visa fazer uma estimativa do seguinte:

- Capacidade de deformação de uma ligação, usando um provete maquinado; destina-se a permitir uma análise sobre a qualidade metalúrgica da junta independentemente da técnica operatória de execução da soldadura.
- Qualificação do soldador, usando um provete geralmente não maquinado, porque neste caso pretende-se avaliar a influência do estado da superfície do cordão e

seus defeitos (de notar que neste último caso a interpretação dos seus resultados é difícil).

Estes ensaios podem ser transversais ou longitudinais consoante o punção incide na direção ou perpendicularmente ao cordão de soldadura.

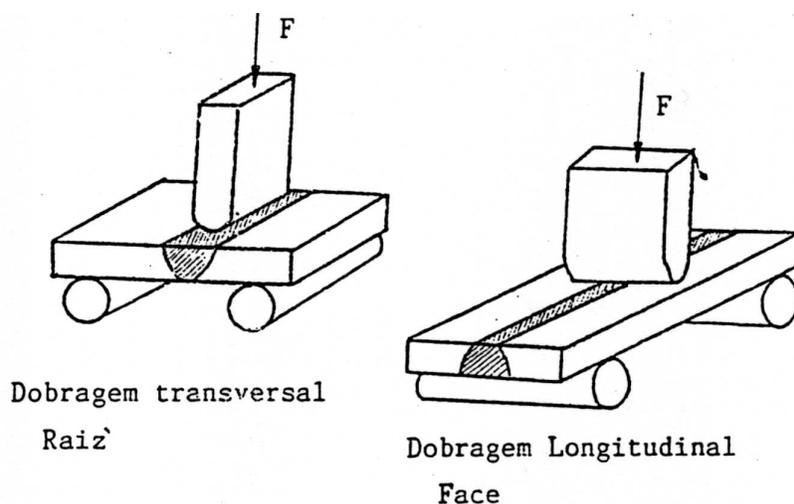


Figura 7 Ensaio de dobragem em juntas soldadas

Consoante o punção incide do lado da raiz ou da face assim se designa por dobragem da raiz ou da face. O primeiro é geralmente mais severo que o segundo.

A qualidade da ligação pode pois ser dada pelo ensaio de dobragem, que é analisado pelo valor do ângulo obtido sem fissurar dependendo ainda da espessura do punção.

O critério de qualidade máxima é um ângulo de 180° sem qualquer fissura local o que é sinal de uma grande ductilidade.

Se a rotura ocorrer antes da dobragem total (180°) proceder-se-á à respectiva interpretação.

Assim, se aparecerem defeitos como poros e inclusões conclui-se pela deficiente qualidade do soldador; se não existir qualquer defeito, a dobragem incompleta significa um certo nível de fragilidade.

De notar que qualquer que seja o objectivo do ensaio (qualidade de soldadura ou qualificação do soldador) há necessidade de proceder ao arredondamento das restas na zona de dobragem.

2.4 Ensaio de dureza

A dureza é a resistência que um material oferece ao ser riscado ou penetrado por outro de dureza superior.

A dureza do material mede a resistência superficial à impressão plástica; é determinada pela medição da incisão ou penetração feita por um penetrador duro, virtualmente indeformável com uma geometria específica e sob uma carga determinada.

Existem diversos ensaios com técnicas diferentes que apresentam resultados quantitativos em escalas não significativas; alguns destes ensaios dirigem-se a uma gama particular de durezas e até de materiais, havendo em alguns casos possibilidade de se estabelecer correspondência entre as escalas de dureza.

No ensaio de Brinell mede-se o diâmetro de uma esfera de aço ou de carboneto de tungstênio que é comprimida contra a face plana do provete; os resultados são apresentados por um número seguido das letras HB (ex^o 400 HB) existem normas que estabelecem os resultados do ensaio de uma forma mais completa, indicando além do valor da dureza, o diâmetro da esfera, a força aplicada e o tempo de aplicação.

A dureza de Brinell está empiricamente relacionada com a tensão de rotura do material, se não estiver superficialmente tratado, pela seguinte expressão $HB = 3 \sigma_r$.

Em termos qualitativos este ensaio permite ainda avaliar o encruamento do material, pois se o penetrador provocar uma coroa sobrelevada em redor da impressão plástica significa que o material tem uma baixa taxa de encruamento., se esta coroa não for visível, o material tem uma elevada taxa de encruamento, pois não permite que a deformação se transmita para além da zona da impressão.

Este ensaio tem o inconveniente do seu resultado depender da força aplicada. Apesar disso é bastante usado devido à sua simplicidade e ao reduzido material necessário.

No ensaio Rockwell, aplicável a materiais mais duros, mede-se a profundidade de penetração feita por um diamante em cone, ou por uma esfera de aço; consoante os níveis de dureza são aplicadas cargas e incisores diferentes.

Consoante os procedimentos, as cargas aplicadas e os incisores assim se obtém subescalas que são referidas por letras do abecedário.

A medição da dureza é expressa por um número, seguido das letras HR e de uma outra letra que designa a subescala (exemplo: 70 HRC).

No ensaio Vickers, ainda para materiais mais duros, o penetrador é um diamante com a forma duma pirâmide invertida.

O resultado (número de dureza Vickers) é obtido pelo quociente entre a força aplicada e a área lateral da impressão e é expresso por um número seguido de letras HV; às vezes seguem-se dois números separados por uma barra (exemplo: 310 HV 50/20) que indicam a força em kgf e o tempo em segundos.

Os resultados destes ensaios podem ser correlacionados com a tensão de rotura, permitindo a aferição da uniformidade do material, verificação dos efeitos dos tratamentos térmicos ou das soldaduras no metal base, bem como as propriedades superficiais no que se refere a resistência ao atrito e ao desgaste. Existe também um elevado interesse na dureza dos materiais utilizados no fabrico de ferramentas.

Para materiais do tipo das borrachas usa-se outro processo de medição que avalia a capacidade de absorção de energia do material quando sujeito a projecção de um pequeno "martelo" metálico.

Trata-se do ensaio SHORE que igualmente apresenta sub-escalas; este ensaio pode ser efectuado com um aparelho portátil, designado durómetro, de interesse na

avaliação expedita da dureza de peças de borracha; actualmente a medição da dureza de elastómetros efectuada em laboratórios, ainda que usando o mesmo procedimento, refere que a dureza é medida em graus internacionais de dureza de borracha (GIDB).

Tabela 1 Escala de dureza de Mohs

Mohs' Scale		Extension of Mohs' Scale*		
Hardness Nº	Reference Mineral	Hardness nº	Reference Mineral	Metal equivalent
1	Talc	1	Talc	
2	Gypsum	2	Gypsum	
3	Calcite	3	Calcite	
4	Fluorite	4	Fluorite	
5	Apatite	5	Apatite	
6	Feldspar (orthoclase)	6	Orthoclase	
		7	Vitreous pure silica	
		8	Quartz	Stellite
7	Quartz	9	Topaz	
8	Topaz	10	Garnet	
		11	Fused zirconia	Tantalum carbide
		12	Fused alumina	Tungsten carbide
9	Sapphire or corundum	13	Silicon carbide	
		14	Boron carbide	
10	Diamond	15	Diamond	

*R. R. Ridgeway, A. H. Ballard, and B. B. Bailey, Hardness Value for Electrochemical Products," *Trans Electrochem. Soc*, vol. 43.

Máquina de ensaios
de Brinell

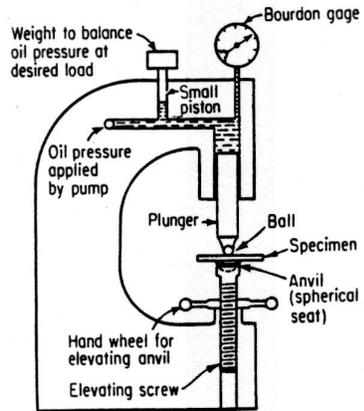


Figure 12.4 Features of hydraulic Brinell machine.

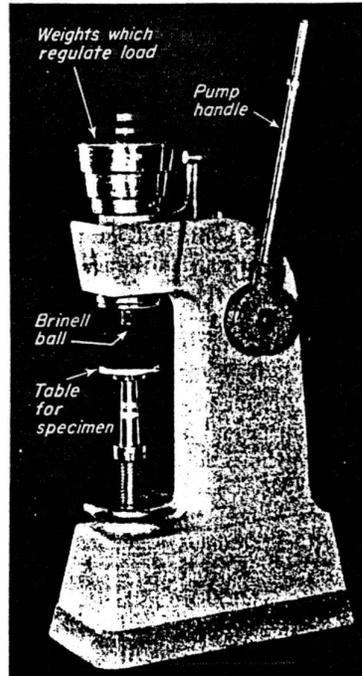


Figure 12.5 Hydraulic Brinell machines. (Courtesy of Riehle Testing Machine Division.)

Figura 8 Máquina hidráulica Brinell

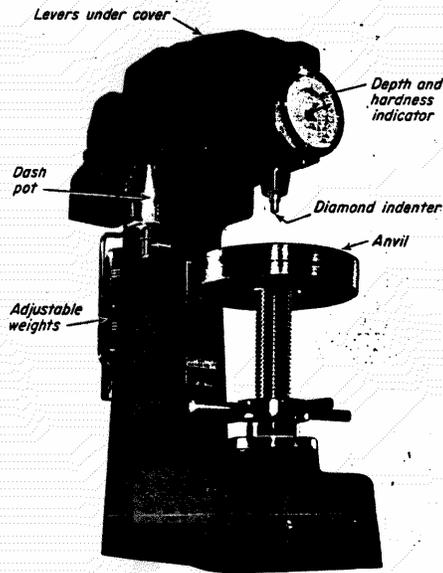


Figure 12.7 Rockwell tester. (Courtesy of Wilson Mechanical Instrument Co.)

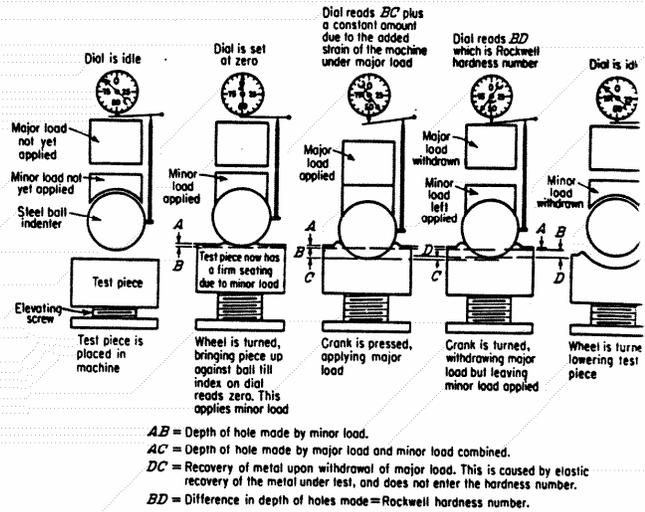


Figure 12.8 Procedure in using Rockwell tester.

Indenter	Major load mass, kg		
	60	100	150
Cone	A	D	C
$\frac{1}{16}$ "-ball	F	B	G
$\frac{1}{8}$ "-ball	H	E	K
$\frac{1}{4}$ "-ball	L	M	P
$\frac{1}{2}$ "-ball	R	S	V

Table 12.5 Rockwell hardness scales and prefix letters[†]

Group	Scale symbol and prefix letter	Indenter	Major load, kg	Dial numerals	Typical applications of scales
1 Common scales	B	$\frac{1}{16}$ -in ball (1.6-mm)	100	Red	Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron
	C	Diamond cone	150	Black	Steel, hard cast iron, pearlitic malleable iron, deep case-hardened steel
2	A	Diamond cone	60	Black	Cemented carbides, thin steel, shallow case-hardened steel
	D	Diamond cone	100	Black	Thin steel, medium case-hardened steel
	E	$\frac{1}{8}$ -in ball (3.2-mm)	100	Red	Cast iron, aluminum and magnesium alloys, bearing metals
	F	$\frac{1}{16}$ -in ball (1.6-mm)	60	Red	Annealed copper alloys, thin soft sheet metals
	G		150	Red	Phosphor bronze, beryllium copper, malleable iron
	H	$\frac{1}{8}$ -in ball (3.2-mm)	60	Red	Aluminum, lead, zinc
3	K		150	Red	
	L	$\frac{1}{4}$ -in ball (6.4-mm)	60	Red	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that does not give anvil effort
	M		100	Red	
	P		150	Red	
	R	$\frac{1}{2}$ -in ball (12.7-mm)	60	Red	
	S		100	Red	
V		150	Red		

[†]Based on ASTM E 18.

Comparação entre ensaios de dureza e tensão de ruptura para aço

Table 12.7 Approximate hardness relations for steel†

Diameter, mm	Brinell, 3000 kg		Rockwell‡						Sclero-scope	Vickers diamond pyramid	Mohs	Tensile strength		
	Standard 10-mm ball	Tungsten carbide ball	A Cone 60 kg	B $\frac{1}{16}$ " ball 100 kg	C Cone 150 kg	D Cone 100 kg	E $\frac{1}{8}$ " ball 100 kg	30 N Cone 30 kg				30 T $\frac{1}{16}$ " ball 30 kg	MPa	ksi
2.50	...	601	79.8	...	57.3	68.7	...	75.1	...	77	640	7.8	2130	309
2.75	495	...	76.7	...	51.6	64.3	...	69.9	...	68	539	7.3	1765	256
3.00	415	415	76.3	...	51.0	63.8	...	69.4	...	59	528	6.8	1450	210
3.25	352	352	72.8	...	44.5	58.8	...	63.5	...	51	440	6.4	1215	176
3.50	302	302	69.3	...	37.9	53.8	...	57.6	...	45	372	6.0	1035	150
3.75	262	262	66.3	...	32.1	49.3	...	52.2	...	39	319	5.6	890	129
4.00	229	229	63.6	...	26.6	45.0	...	47.3	...	34	276	5.0	765	111
4.25	202	...	60.8	...	20.5	40.5	...	41.9	...	30	241	4.5	675	98
4.50	179	...	58.0	93.0	...	37.0	111	37.0	78.0	27	...	4.8	605	88
4.75	159	...	56.0	88.0	...	33.0	108	32.0	78.0	24	...	4.6	545	79
5.00	143	...	53.0	83.0	...	31.0	106	28.0	72.0	22	...	4.5	495	72
5.25	128	...	...	78.0	...	...	103	...	69.0	...	...	...	...	...
5.50	116	...	...	71.0	...	...	100	...	64.0	...	...	...	450	65
5.75	105	...	...	65.0	...	...	96	...	60	...	...	...	415	60
			...	58.0	...	...	92	...	55	...	...	...	370	54

† Based on *Metals Handbook—1961*, American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1961. See ASTM E 140 for additional relations.
 ‡ $\frac{1}{8}$ in = 3.175 mm; $\frac{1}{16}$ in = 1.5875 mm (exactly).

Aparelhagem para medição de dureza em borrachas e materiais afins

Escleroscópios

Duro metros



Figure 12.3 Type A-2 Durometer for rubberlike materials. (Courtesy of Shore Instrument and Manufacturing Co.)

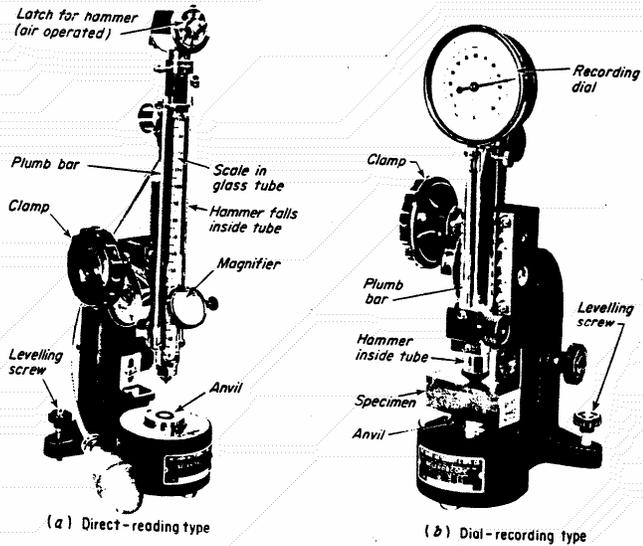


Figure 12.9 Scleroscopes.

3 Resistência à fractura

3.1 Introdução

A resistência à fractura de um componente está directamente associada à sua tenacidade embora dependa também do nível de tensão, da temperatura e da dimensão do defeito.

A tenacidade pode ser definida como a propriedade que caracteriza a resistência que o material apresenta à iniciação ou propagação de fendas.

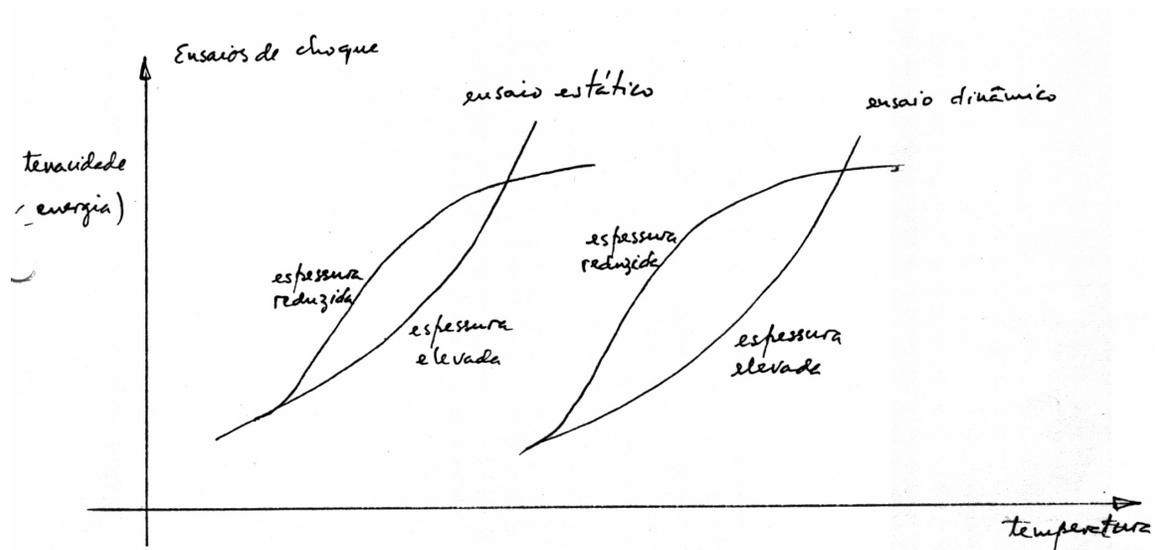


Figura 9

A fractura pode ocorrer por clivagem ou por coalescência de vazios ou ainda através de um mecanismo misto.

A fractura por clivagem é uma fractura transgranular que ocorre segundo planos cristalográficos definidos e onde o plano da fractura muda de grão para grão. Estas são correntemente designadas por fracturas frágeis.

A fractura por coalescência de vazios, tal como o nome indica, ocorre sempre por crescimento e associação de vazios sob a acção de sistemas de tensões de tracção. Estes vazios formam-se normalmente na interface entre a matriz e partículas duras tais como carbonetos e inclusões não metálicas, existentes em todos os tipos de aços utilizados em construção soldada. Estas são as fracturas dúcteis.

Devido ao seu carácter brusco, as fracturas frágeis são mais preocupantes porque ocorrem falhas catastróficas.

3.2 Propriedades de Tenacidade e Resistência à Fractura

A necessidade de evitar falhas do material por rotura, como as que ocorreram na 2ª Guerra Mundial, levou ao desenvolvimento de alguns ensaios, concebidos para determinar a capacidade de absorção de energia dos materiais, antes da rotura.

3.3 Ensaio Charpy V

Este ensaio, designado por CVN, é o ensaio empírico de determinação da tenacidade mais usado, servindo de base da avaliação de inúmeros aços de construção naval. O seu uso generalizado deriva de ser um ensaio rápido, simples e económico. Embora permita uma correlação com determinados comportamentos em serviço, este ensaio apenas se relaciona indirectamente com a mecânica da fractura; não pode ser directamente usado de forma quantitativa, em projecto, por não se relacionar com níveis de tensões ou de deformações.

O provete do ensaio CVN é uma viga entalhada, que é colocada numa base, ficando simplesmente apoiada; a viga, cuja temperatura é controlada, é fracturada pelo impacto de um pêndulo animado de uma determinada energia, relacionada com a altura a que se encontra a sua massa. A diferença entre a altura inicial do pêndulo e a altura a que ele sobe após a rotura do provete, mede a energia absorvida na rotura do provete. Em aços de construção naval e em aços estruturais em geral, uma pequena energia absorvida está relacionada com uma rotura frágil do material.

Nalguns ensaios mais sofisticados, é possível medir a expansão lateral do provete na zona da rotura; este valor é proporcional à energia absorvida.

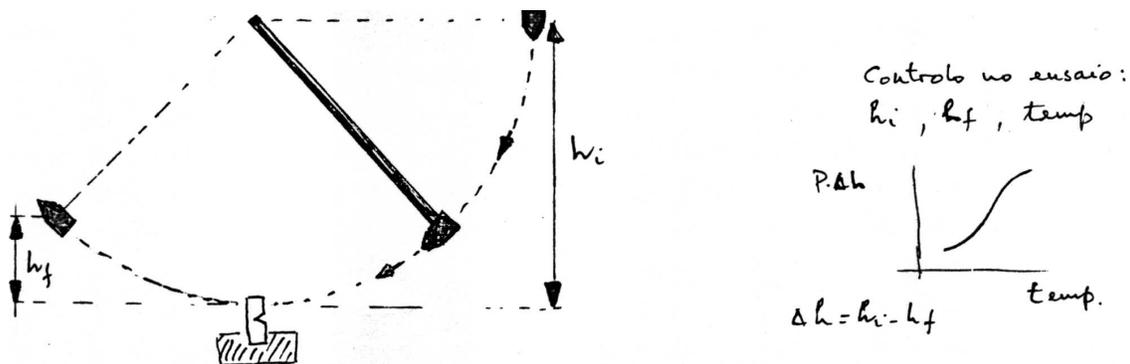
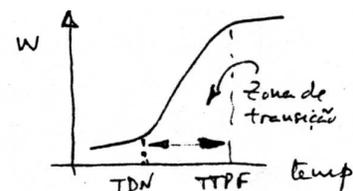


Figura 10

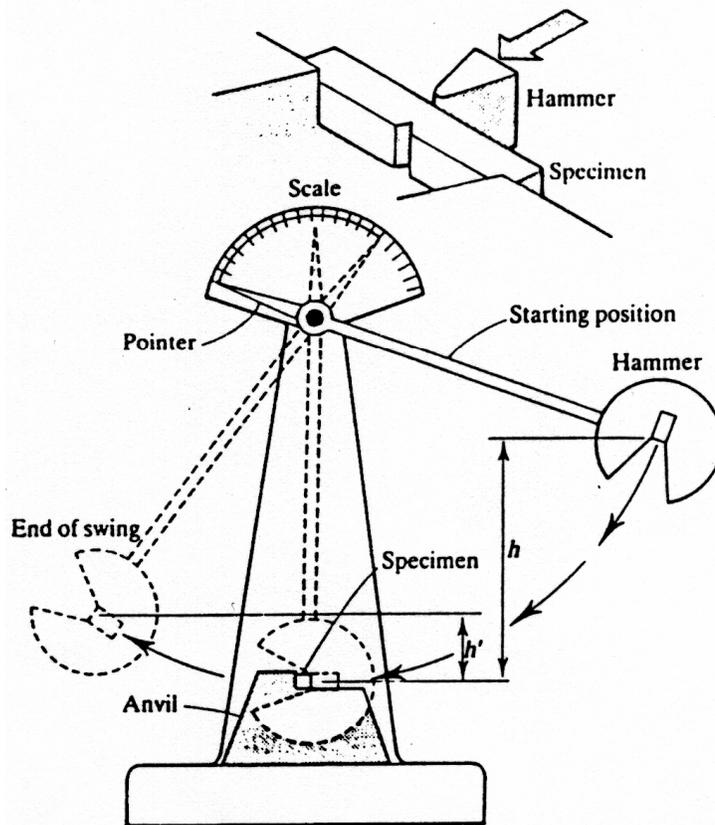
A aparência da superfície de fractura, também nos dá informação sobre a tenacidade do material.

Verifica-se através deste ensaio que alguns materiais correntemente usados, apresentam características de resistência ao choque muito diversificadas, consoante a temperatura; assim a temperaturas mais elevadas o material apresenta-se dúctil e absorve um valor de energia relativamente elevado, para se partir; a temperaturas mais baixas o material rompe de uma forma frágil requerendo muito menos energia. Em diversos materiais, designadamente no aço não ligado, existe uma zona de transição bem definida entre as zonas onde o comportamento é claramente frágil ou dúctil.

A temperatura mais elevada onde a superfície de rotura do provete se apresenta totalmente frágil designa-se por temperatura de dualidade nula (TDN); a temperatura mais baixa onde a superfície de rotura do provete se apresenta totalmente dúctil, designa-se por temperatura de transição plástica (TTPF).



Os resultados destes ensaios ainda que muito populares apresentam algumas limitações como sejam a energia com níveis de tensão e apresentam variações significativas com a espessura do provete e com outros parâmetros.



Schematic drawing of a Charpy V-notch impact testing apparatus. A hammer attached to the end of a frictionless pendulum is released from the height h . At the bottom of its arc it strikes a notched specimen. The high strain rate concurrent with the impact of the hammer on the sample, and the constraint on plastic deformation provided by the notch, are conducive to fracture. Subsequent to fracturing the sample, the pendulum rises to a height h' , and the potential energy difference $mg(h - h')$ represents the energy expended in sample fracture. This energy, measured directly by the pointer on the scale, represents plastic deformation work prior to fracture as well as that associated with fracture initiation and propagation. (From H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff. *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III. Wiley, New York, 1965.)

Table 13.1 Effect of angle of notch on energy of rupture of mild steel†

Angle of notch, °	Sketch of specimen	Charpy impact value	
		J	ft-lb
0		30.0	22.1
30		33.1	24.4
60		31.3	23.1
90		35.1	25.9
120		56.7	41.8
150		89.8	66.2
180		85.6	63.1

†J. J. Thomas, "The Charpy Impact Test on Heat-treated Steels," *Proc. ASTM*, vol. 15, pt. II, 1915.

Table 13.2 Effect of root radius of 45° V notch on energy of rupture of 0.65 percent carbon steel

Root radius of notch, 2 mm deep, mm	Charpy impact value	
	J	ft-lb
Sharp	5.4	4.0
0.17	9.5	6.9
0.34	11.3	8.3
0.68	18.6	13.7

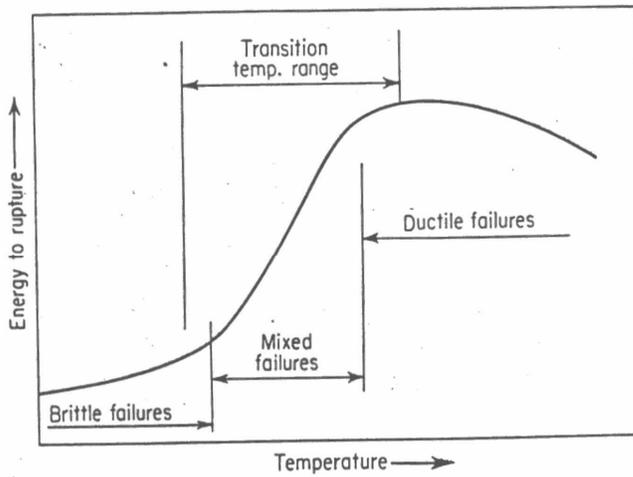
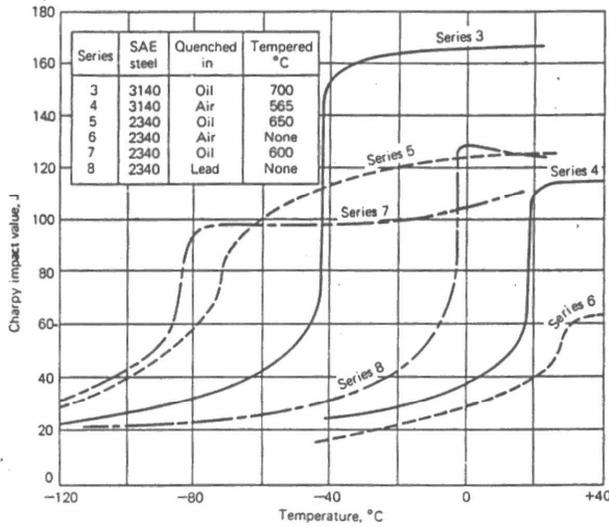
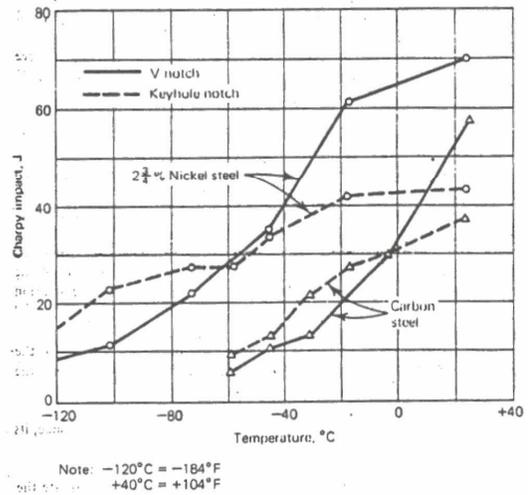


Figure 13.11 Variation with temperature of energy to rupture in impact tests of metals.

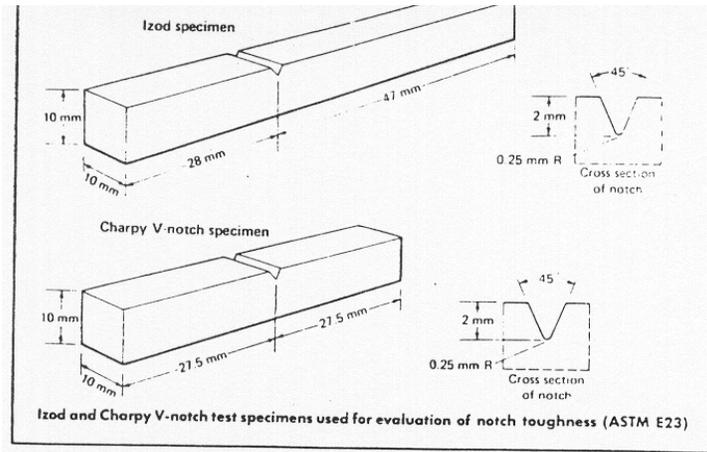


Note: 100 J = 74 ft-lbf.

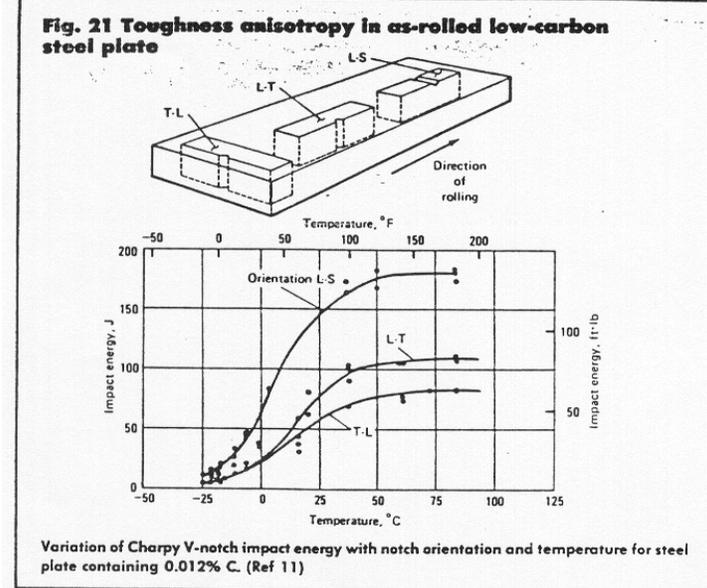
Figure 13.12 Variation in transition-temperature range for steel in the Charpy test. (and Yen, Ref. 19.)



Note: -120°C = -184°F
+40°C = +104°F



Dimensões dos provetes
 - Ensaio Izod
 - Ensaio Charpy



Varição da resistência ao choque com a orientação do material (anisotropia na tenacidade)

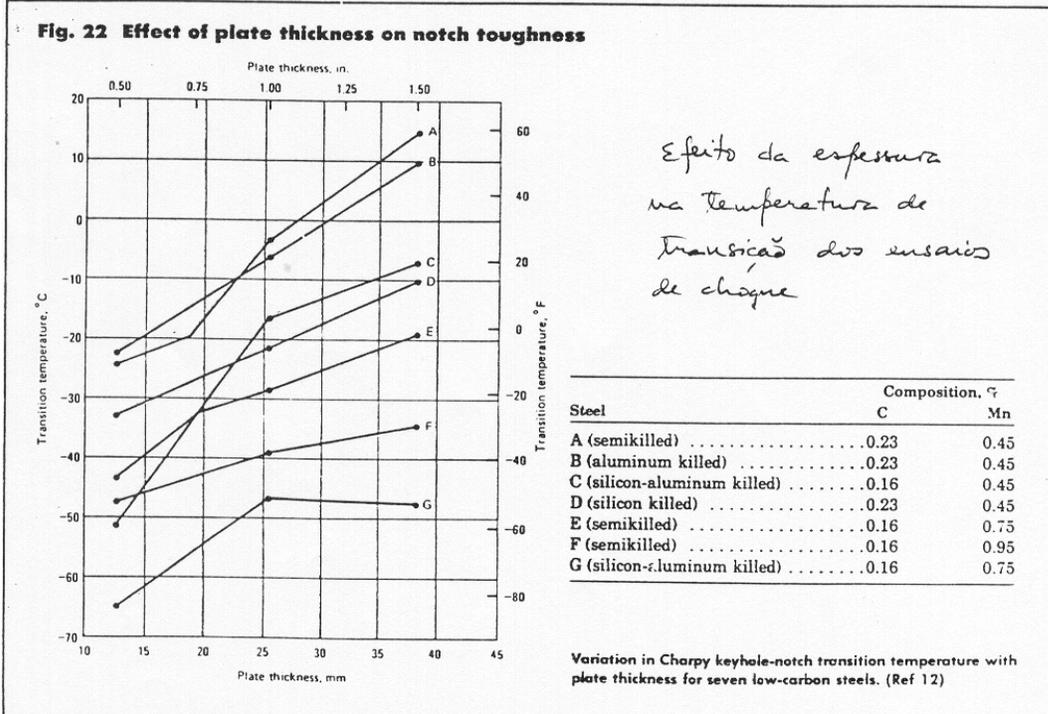
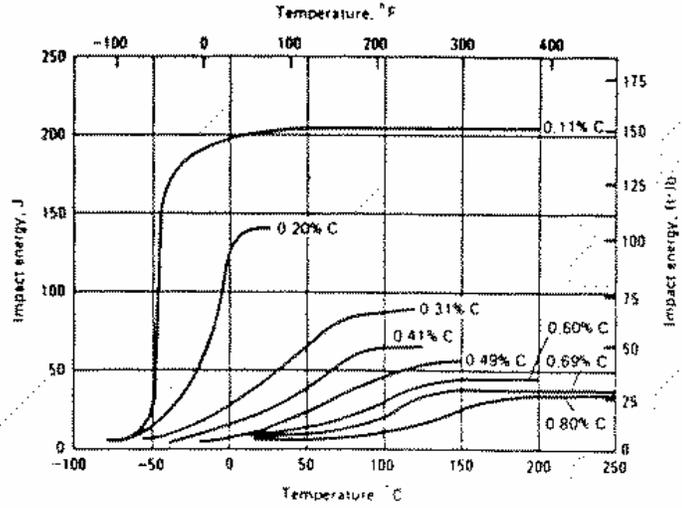
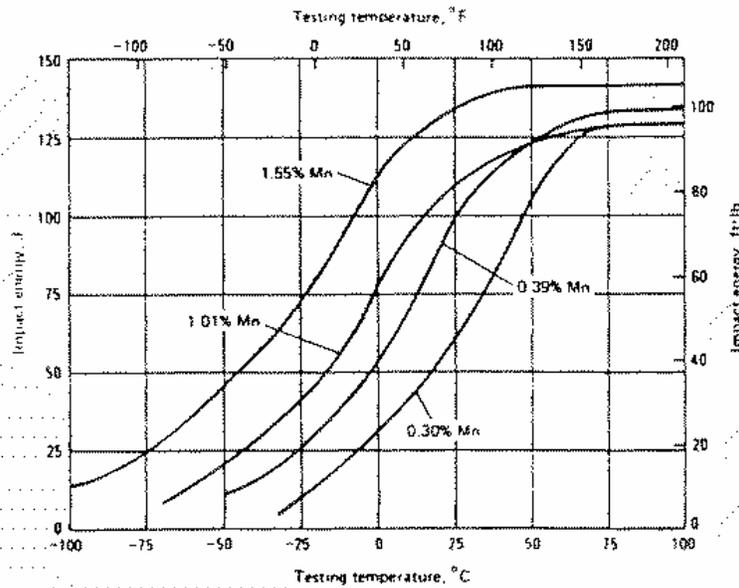


Fig. 4 Effect of carbon content on notch toughness



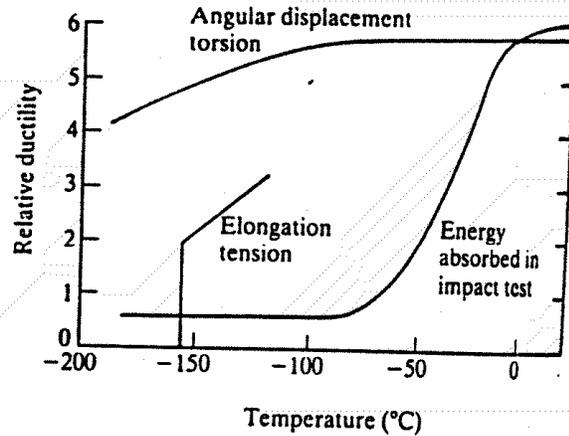
Variation in Charpy V-notch impact energy with temperature for normalized plain carbon steels of various carbon contents. (Ref 3)

Fig. 7 Effect of manganese content on notch toughness

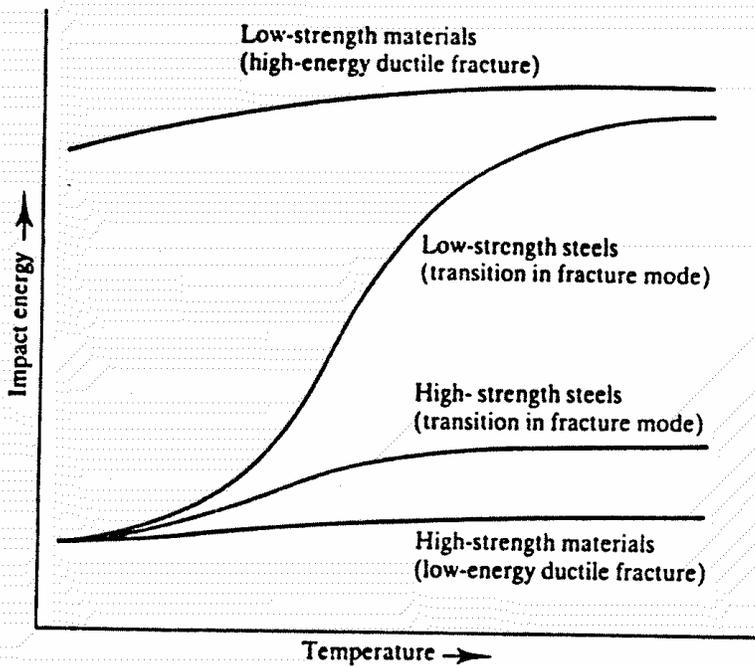


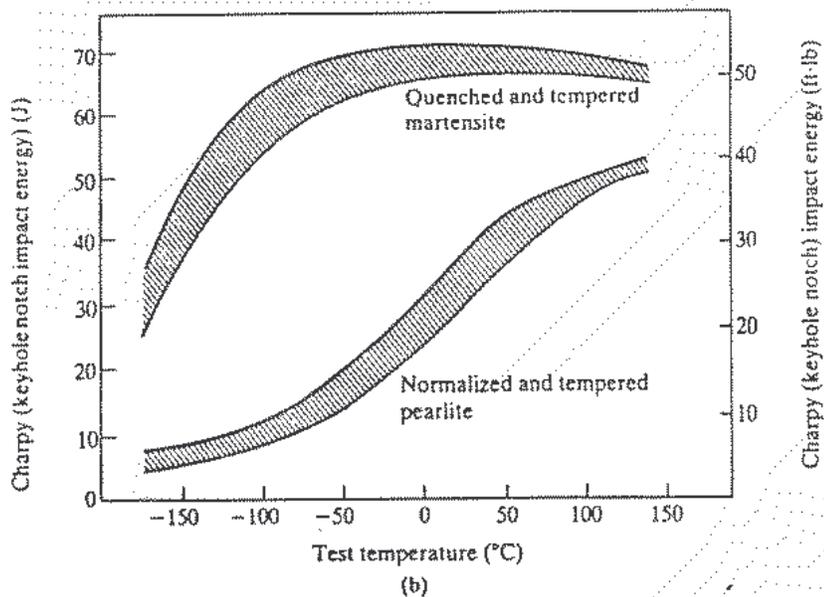
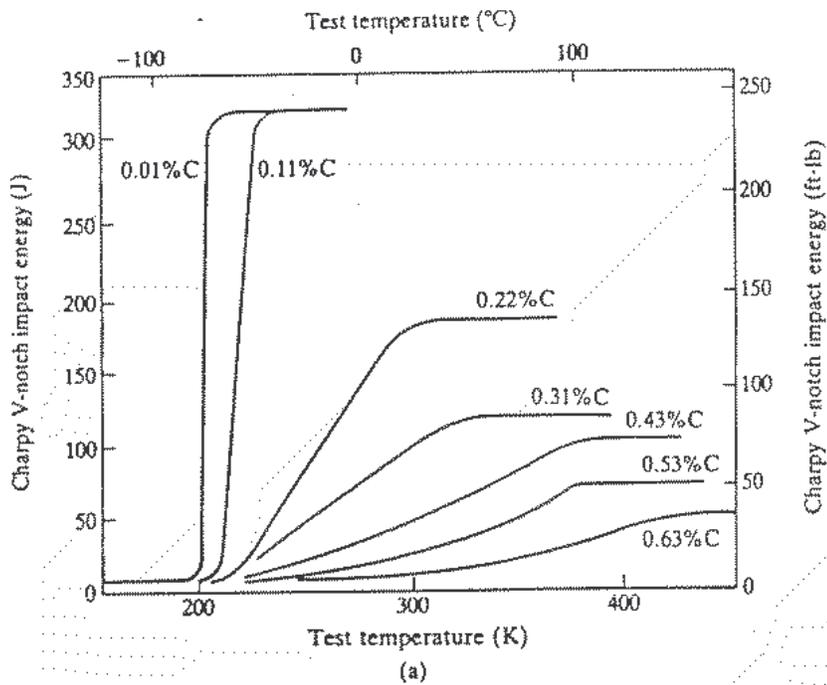
Variation in Charpy V-notch impact energy with temperature for 0.30% C steels containing various amounts of manganese. The specimens were austenitized at 900 °C (1650 °F) and cooled at approximately 14 °C (25 °F) per minute. The microstructures of these steels were pearlitic. (Ref 5)

The temperature dependence of the relative "ductility" of iron as measured directly by angular displacement in a torsion test and elongation in a tensile test, and indirectly by the energy absorbed in an impact test. The ductile-to-brittle transition temperature depends strongly on the stress state imposed. It is lowest for torsion, when the shear stress is large vis-à-vis the maximum tensile stress, and it is highest for the impact test, when a strong triaxial tensile stress state is developed in conjunction with a high strain rate. (After K. Heindlhofer, *Trans. TMS-AIME*, 116, 232, 1935.)



Schematic of the temperature variation of the impact energy for several classes of materials. For low-strength materials that do not exhibit low-temperature brittle cleavage fracture, the impact energy is high and temperature-insensitive. Low-strength steels display high values of impact energy at high temperatures, at which they fail in a microscopically ductile manner. At low temperatures, at which their yield strengths are high and they fail by cleavage, their impact energies are low. This transition in fracture mode is mirrored by a like transition in impact energy. High-strength steels also manifest a transition in microscopic fracture mode. However, since the work required to fracture these steels is always low, their impact energies are also low even at temperatures at which they fail ductilely.





The impact energy and its temperature variation are structure-sensitive. (a) The impact energy as a function of temperature for plain carbon steels of varying carbon content. Transition temperature increases as the carbon content (and therefore the amount of pearlite) does. Moreover, shelf energies are higher for low-pearlite-content steels. (b) The Charpy keyhole impact energy as a function of temperature for a 4340 alloy steel in two microstructural conditions. The hardnesses and yield strengths of the pearlite and tempered martensite structures were made the same by appropriate heat treatment. But the pearlitic steel, which contains Fe_3C in lamellar and connected form, has a much higher transition temperature than the quenched and tempered steel in which Fe_3C is dispersed within the ferrite matrix. (In the keyhole test, the "notch" is shaped like a keyhole rather than like a V in the normal impact test. The lesser constraint against plastic deformation provided by the keyhole results in a generally higher impact energy and lower transition temperature than found in a V notch test.) Part (a) after J. A. Rineholt and W. J. Harris, Jr., *Trans. ASM*, 43, 1175, 1951; (b) after Society of Automotive Engineers, SP 65, *Low Temperature Properties of Ferrous Materials*.

3.4 Ensaio da Queda do Peso

Neste ensaio, cujas iniciais são DWT, o provete contendo um entalhe, é sujeito a uma carga de impacto numa massa em queda; este ensaio é efectuado com controle de temperatura. A temperatura mais elevada a que a fissura se forma e se propaga até à aresta do provete, é definida por temperatura de ductilidade nula (TDN). Esta temperatura representa a temperatura mais elevada a que o material exibe um comportamento frágil na presença de pequenas falhas ou descontinuidades a baixos níveis de tensão aplicada.

Este ensaio, alternativo ao CVN, requer equipamento mais complexo, não fornece qualquer informação sobre a absorção de energia e não é tão divulgado, não existindo tanta informação disponível.

3.5 Rotura dos materiais (complementos)

Como se referiu noutra oportunidade é importante conhecer os mecanismos de rotura para permitir:

- um dimensionamento adequado
- a dedução das origens de uma rotura que tenha ocorrido

Referiu-se também as principais formas de rotura:

- rotura dúctil
- rotura frágil
- rotura por fadiga

A análise da rotura através de estudos energéticos permitiram um estudo desenvolvido dessa matéria através da Mecânica da Fractura Linear Elástica (MFLE) e posteriormente na Mecânica da Fractura Elasto-plástica (MFEP).

Não cabendo no âmbito desta disciplina o estudo detalhado destas teorias e seus desenvolvimentos, abordaremos rapidamente alguns aspectos importantes.

3.6 Mecânica da Fractura Linear Elástica (MFLE)

Os materiais ao serem sujeitos a solicitações mecânicas externas desenvolvem tensões internas que correspondem à energia armazenada (energia elástica de deformação). Quando as peças têm defeitos ou apresentam fissuras, no fundo dessas fissuras ou na raiz dos defeitos os valores da tensão atingem a tensão de cedência; a extensão da zona plástica em redor dessa zona varia com os materiais e com a sua temperatura.

A rotura ocorre quando os valores das tensões e a dimensão e forma dos defeitos ou fissuras são tais que se provoca um desequilíbrio entre a energia aplicada e a capacidade de absorção de energia da peça. Esta rotura tem características frágeis.

Quando as solicitações aplicadas provocam na peça tensões perpendiculares à orientação principal do defeito, define-se um factor K designado por factor de intensidade de tensões; por definição ainda, $K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$, em que Y é um factor

geométrico, isto é, depende da geometria da peça e das condições de carga; σ é a tensão aplicada e a representa o valor da medida linear do defeito.

As figuras que se seguem mostram as configurações básicas que podem originar rotura e que são designadas por modo de rotura, I, II, III.

Modo de Rotura

I - tensão normal ao plano da fenda

II – tensão de corte no plano da fenda

III – tensão de corte longitudinal

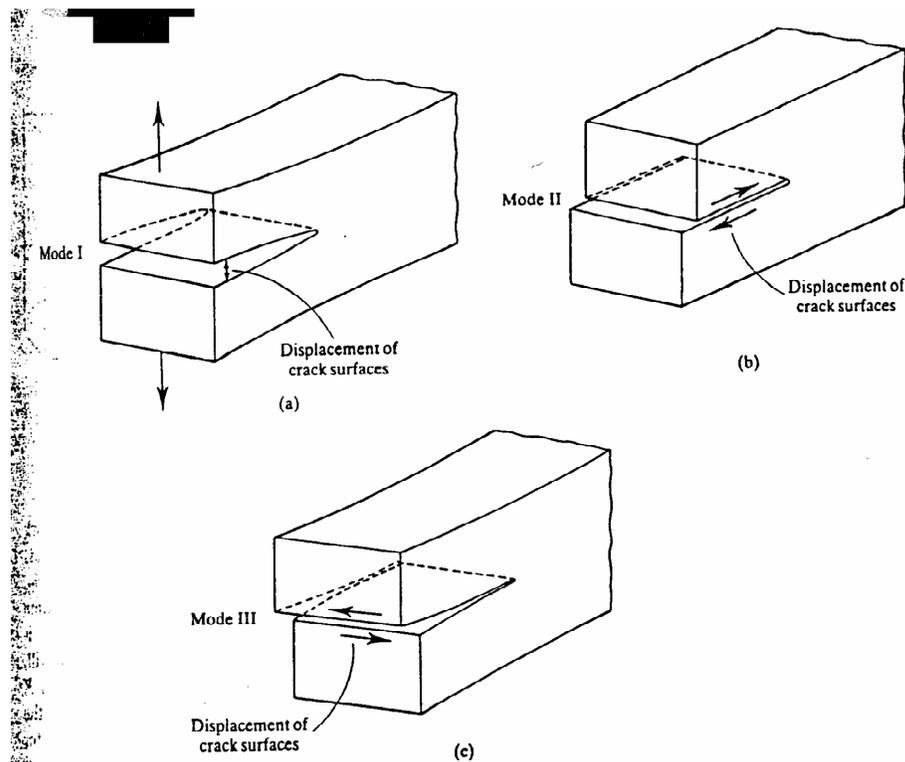


FIGURE 10.2 The three primary macroscopic fracture modes. (a) Mode I fracture, or tensile opening mode, is the most common of tensile fractures, and is caused by a force tending to open up the crack and the crack tip. The crack propagates in a direction normal to the force applied to Mode I fracture. (b) In Mode II fracture, a shear type of fracture, separation of the bar is achieved by propagation of the crack surface in a direction parallel to the sense of the applied shear stress. (c) In Mode III fracture, also called antiplane strain fracture, a shear stress causes displacement of the crack surfaces as shown. This results in the crack propagating in the direction normal to the shear stresses and produces a tearing type of fracture.

The tensile stress variation in front of a notch in a thin plate when only elastic deformation takes place in front of the notch. The primary tensile stress component (σ_{x_2}) varies with distance from the crack tip as $r^{-1/2}$. The constraint provided by the notch gives rise to a secondary tensile stress, σ_{x_1} . It is zero at the notch surface, but rises sharply at distances removed from it. At larger distances, σ_{x_1} scales with σ_{x_2} . Thus, a state of biaxial stress develops in front of a notch in a thin sheet.

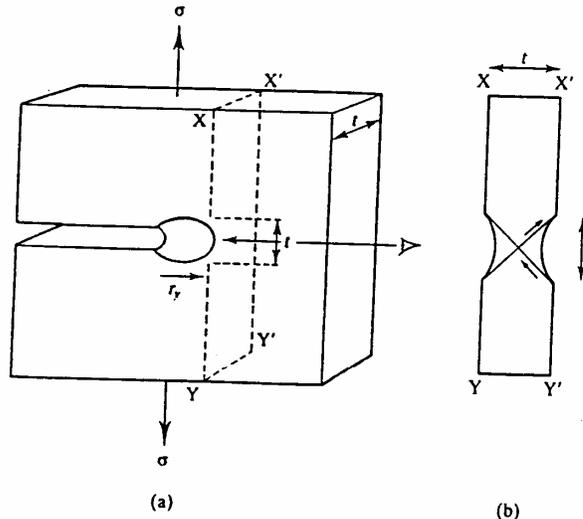
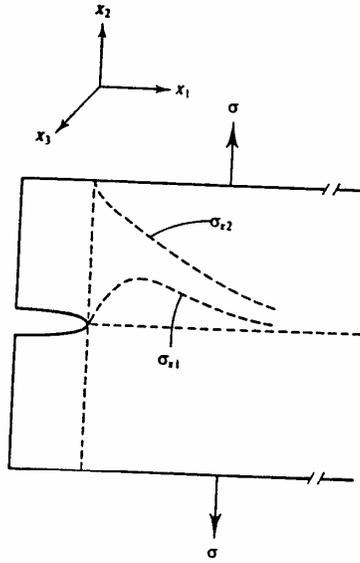
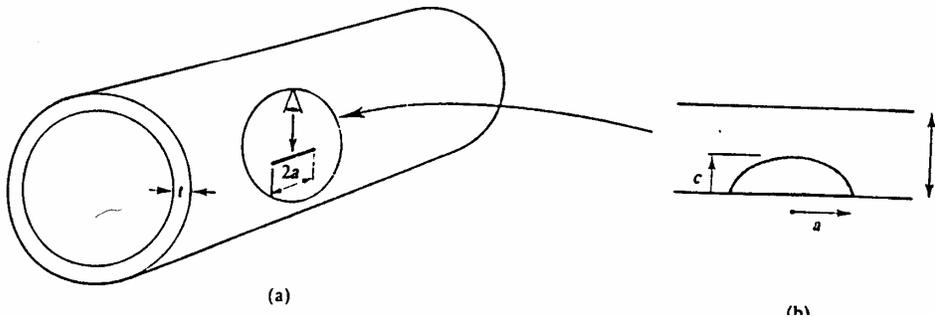
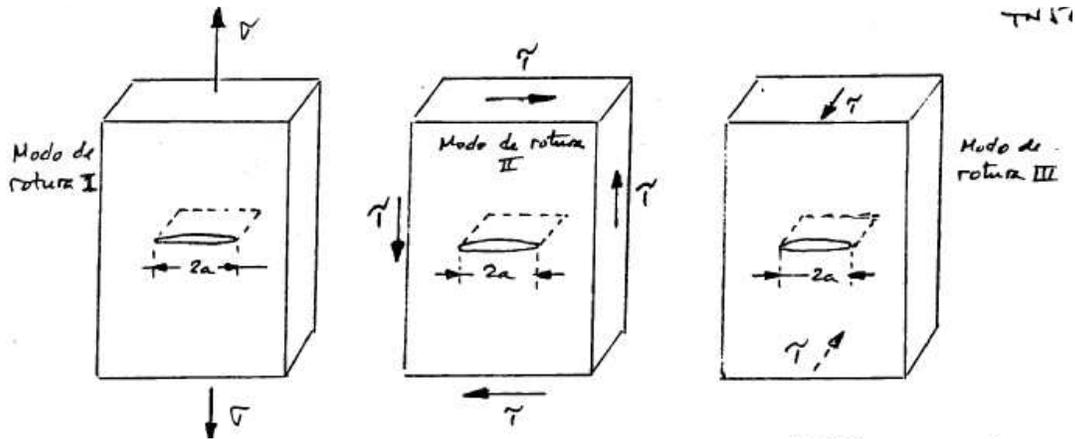


FIGURE 10.5 Crack propagation accompanied by plastic deformation in a thin sheet. (a) The plastic zone extends a distance r_p in front of the advancing crack. The vertical distance above and below the crack plane is defined by the sheet thickness t ; that is, r_p is comparable to t . Deformation in the plastic zone in front of the crack tip is accompanied by a thinning down of the sheet in the x_3 direction. For example, by observing the projection $XX'YY'$ (b), we see that the shear deformation results in a strain in the x_3 direction that produces the sheet thinning.

FIGURE 10.12 (a) An elliptically shaped surface crack in a pressure vessel. The crack is of external length $2a$ and projects into the wall the distance c (as in Fig. 10.12b). Flaws of this shape are observed commonly in structural members like this. Stress-intensity factors are available in the fracture mechanics literature for these flaws, as is shown in examples 1 and 2 of Section 10.2E.



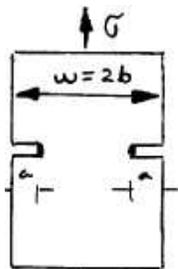


De notar que a equação acima indicada ($K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$) pode ter configurações diversas em situações complexas, próximas da realidade.

O valor K_I (ou K_{II} , ou K_{III}), quando atinge um valor crítico corresponde à rotura; este valor, designado por factor de intensidade de tensão K_c , em determinadas situações (espessuras elevadas) torna-se uma propriedade do material e designa-se por K_{IC} - Tenacidade à Fractura.

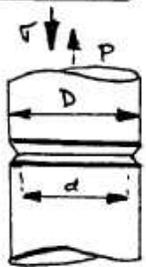
A grande importância destes factores de intensidade de tensões (aplicáveis em situações em que os materiais são frágeis ou semi-frágeis) deriva de poder ser usado em projecto, pois manipula tensões, e de corresponder a uma rotura antes de se atingir a tensão de rotura σ_r .

Mostramos a seguir algumas formas de apresentação do factor de intensidade de tensões, dependentes da configuração da peça e da forma do carregamento.



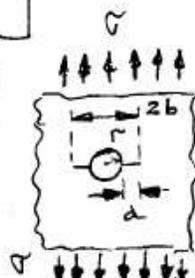
Duas fendas simétricas numa peça de largura finita submetida a uma tensão de tracção

$$K_I = \sigma\sqrt{a} \left[\frac{\omega}{a} \left(\tan \frac{\pi a}{\omega} + 0.1 \operatorname{sen} \frac{2\pi a}{\omega} \right) \right]^{1/2}$$



Varão com um entalhe circunferencial submetido a uma carga de tracção P

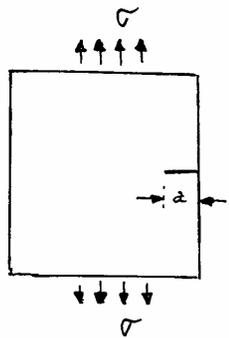
$$K_I \approx \frac{0.932 P\sqrt{D}}{\sqrt{\pi d^2}} \quad \text{válido para } 1.2 \leq \frac{D}{d} \leq 2.1$$



Fendas a partir dum orifício circular num corpo infinito

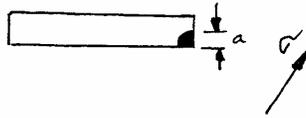
$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{r}\right)$$

(a/r)	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
F(a/r)	2.73	2.41	1.96	1.71	1.58	1.45



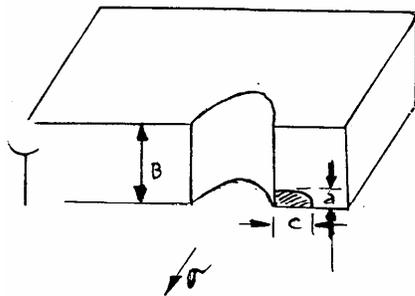
Fenda semicircular de canto numa placa submetida à tracção

$$K_I \sim (1.12)^2 \frac{\sigma}{\pi} \sqrt{\pi a}$$



Fenda eliptica de canto num orifício circular numa placa submetida à tensão σ

$$K_I \sim 1.12 (3\sigma) \left(\frac{\pi a}{Q} \right)^{1/2} \left(\frac{2B \tan \frac{\pi a}{2B}}{\pi a} \right)^{1/2}$$

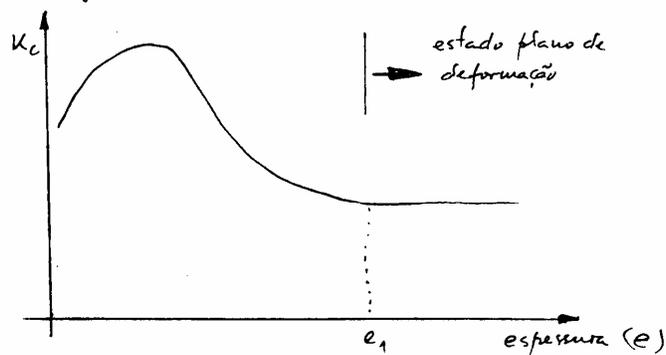


Q = parâmetro de forma dependente da relação $\frac{a}{2c}$

B = espessura ou largura

Determinação da tenacidade à fractura K_{Ic}

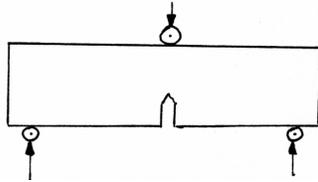
Como se disse, o parâmetro K_{Ic} torna-se constante para espessuras elevadas, dependendo exclusivamente do material, passando-se a designar K_{Ic} .



$$e_1 \sim 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2$$

Existem ensaios normalizados para determinar o K_{Ic} . São os ensaios “CT” com um provete semelhante ao da figura ao lado.

É o ensaio de flexão a 3 pontos, cuja forma, dimensões, detalhes do entalhe, etc., são especificados através de norma própria.



Estes conceitos e os resultados dos ensaios são importantes em materiais metálicos de alta resistência e baixa ductilidade de espessuras médias e elevadas e de temperaturas abaixo da temperatura de fluência; materiais metálicos de média ou baixa resistência e elevada ductilidade em espessuras muito elevadas (superiores a 250mm) e/ou temperaturas muito baixas (inferiores a 0°C). São ainda usados em materiais não metálicos de comportamento frágil tais como o vidro, perspex e outros polímeros frágeis.

Convém referir que a orientação do provete relativamente à chapa é fundamental nos resultados dos ensaios.

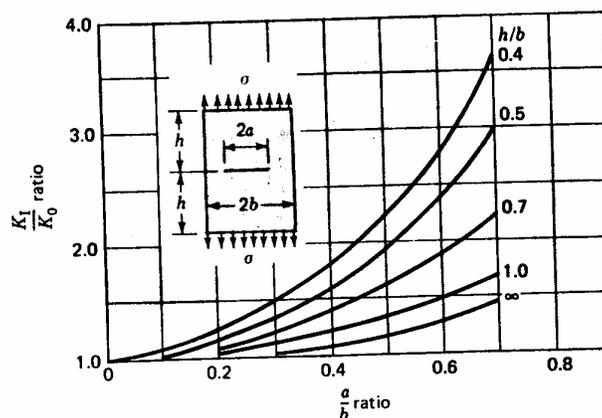
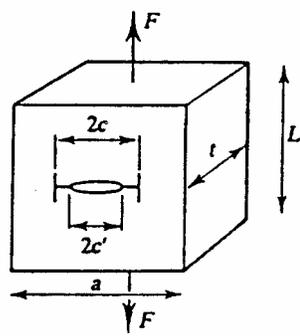
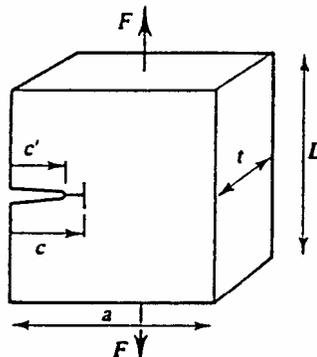
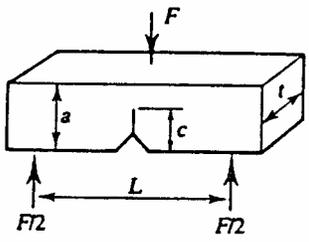


Tabela 2 Valores de K_{Ic} para diferentes materiais (Shigley)

Material	K_{Ic} (MPa.m ^{1/2})	Sc (MPa)
Al – 2024	26	455
Al – 7075	24	495
Al – 7178	33	490
Ti – IMI 318	115	910
Ti – IMI 318	55	1035
Aço – BS816M40	99	860

Aço – BS816M40	60	1515
Aço – BS535A99	14	2070

FIGURE 10.11 Several specimens suitable for measuring plane strain critical stress intensity factors. K_{Ic} is defined by $\sigma_F(\pi c)^{1/2}f(c/a)$, where σ_F is the critical fracture stress and $f(c/a)$ is a function of the geometry of the test specimen. The crack length (c) used in the calculation of K_{Ic} is that of the initial machined notch (c') plus the increment provided by sharpening the crack prior to testing. Specifications for producing generally plane strain conditions are noted. However, the sheet thickness should always be compared to the plastic zone size ($r_p \cong K_{Ic}^2/2\pi\sigma_F^2$) calculated from measured K_{Ic} to verify this. The crack length used in the calculation should be increased to take into account the influence the plastic zone has on the effective crack length. The correction is not significant if $c \gg r_p$.

Specimen type	$f(c/a)$	Comments
<p>Center notched tension</p>  <p>$K_{Ic} = \sigma_F \sqrt{\pi c} f(c/a)$ $\sigma_F = F_c/ta$</p>	$\left(\frac{a}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{a}\right)^{1/2}$	<p>Specifications</p> <p>$L = 4a, 2c = a/3$</p> <p>For K_{Ic}</p> <p>$10 > a/t > 5$</p>
<p>Compact tension</p>  <p>$K_{Ic} = \sigma_F \sqrt{\pi c} f(c/a)$ $\sigma_F = F_c/ta$</p>	$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[29.6 - 185.5 \left(\frac{c}{a}\right) + 655.7 \left(\frac{c}{a}\right)^2 - 1017 \left(\frac{c}{a}\right)^3 + 638.9 \left(\frac{c}{a}\right)^4 \right]$	<p>Specifications</p> <p>$c = a/2$</p> <p>For K_{Ic}</p> <p>$a/t > 2$</p>
<p>Three-point bend</p>  <p>$K_{Ic} = \sigma_F \sqrt{\pi c} f\left(\frac{c}{a}\right)$ $\sigma_F = F_c/ta$</p>	$\frac{L}{\sqrt{\pi a}} \left[2.9 - 4.6 \left(\frac{c}{a}\right) + 21.8 \left(\frac{c}{a}\right)^2 - 37.6 \left(\frac{c}{a}\right)^3 + 387 \left(\frac{c}{a}\right)^4 \right]$	<p>Specifications</p> <p>$L = 8a, c = a/5$</p> <p>For K_{Ic}</p> <p>$8 > a/t > 2$</p>

3.7 Mecânica da Fractura Elasto-plástica (MFEP)

Existe um grupo de materiais importantes em construção mecânica cuja fractura ocorre geralmente com uma grande quantidade de plasticidade, que invalida as teorias da MFLE.

O parâmetro equivalente ao factor de intensidade de tensão K é o deslocamento no fundo da fissura d.

Este parâmetro procura caracterizar a capacidade do material se deformar plasticamente antes da fractura, medindo o afastamento das duas faces da fenda preexistente na sua extremidade.

Devido à complexidade deste assunto recomenda-se aos alunos interessados a leitura do capítulo 13 de “Mecânica dos Materiais” de C. Moura Branco, Ed. Gulbenkian.

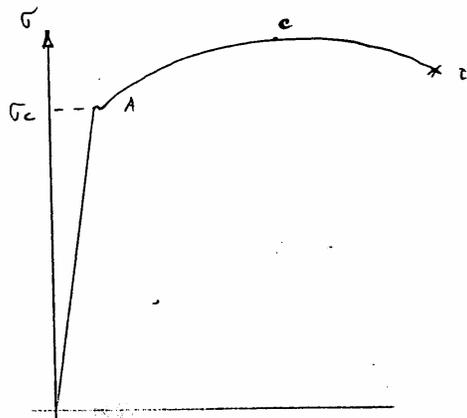
3.8 Deformação plástica - complementos

Sendo a deformação plástica um dos principais processos tecnológicos usados na construção naval, é conveniente analisar em maior pormenor o comportamento dos materiais dúcteis no domínio plástico.

A deformação plástica do material processa-se de A até D, ponto em que se dá a rotura do provete.

O ponto C é o ponto de carga máxima correspondendo à tensão de rotura (ou resistência à tracção).

De A a C a deformação plástica do material é geralmente homogénea, sendo realizada a volume constante.



Durante este período da deformação plástica a tensão aumenta continuamente para prosseguir a deformação consistindo num fenómeno chamado encruamento ou endurecimento do material, porque a dureza aumenta até um valor máximo em C. De C a D a deformação plástica deixa de ser homogénea, sendo instável, a qualidade superficial baixa significativamente, não sendo aconselhável trabalhar o material nesta zona. Na região plástica todo e qualquer descarregamento do material realiza-se numa linha paralela à zona linear elástica do diagrama, havendo uma recuperação elástica, mas permanecendo uma

deformação permanente.

Com base nos resultados obtidos no ensaio de tracção, definem-se duas propriedades que são mais características dos materiais usados em trabalhos de chapa. A primeira é o expoente de encruamento n, que define a aptidão para a estiragem e a segunda é o coeficiente de anisotropia R_a , que define a aptidão para a embutidura (deformação profunda). A equação que se segue permite obter o expoente de encruamento:

$$\sigma = K e^n$$

n e K são respectivamente o expoente e o coeficiente de encruamento e em que $n \approx \epsilon_{\max}$.

Quanto maior for este valor melhor a ductilidade do material. O coeficiente de anisotropia define-se como a razão entre a extensão verdadeira na direcção da largura da chapa e a extensão verdadeira na direcção da espessura da chapa em provetes retirados da chapa em diversas direcções e que sofreram extensões de 15 a 20%. Pretende tomar em linha de conta a variação das deformações plásticas com a direcção, fenómeno que interessa considerar nas peças embutidas.

Um material aconselhável para embutidura deve apresentar um grau de anisotropia alto para que não se verifiquem fenómenos de instabilidade e orientação preferencial de deformação.

3.9 Fluência

A fluência é a deformação plástica progressiva que o material sofre quando sujeito a solicitações de tracção, inferiores à tensão de cedência, durante um período de tempo que normalmente é longo. Para os materiais metálicos só ocorre fluência para temperaturas do material da ordem de metade da temperatura de fusão. Nos polímeros nota-se fluência à temperatura ambiente. Uma outra forma de caracterizar este mecanismo, é a relaxação de tensões que se verifica em peças que estão estrangidas, isto é, que não se deformam livremente. Os ensaios de fluência são dispendiosos porque se prolongam por períodos longos. Normalmente o ensaio é truncado no tempo, fazendo-se depois um extrapolação até à ocorrência da rotura. À fluência provoca deformações de três naturezas diferentes: a elástica, a plástica, e a de fluência. Quando se interrompe a acção da solicitação que provoca a fluência, a deformação elástica é imediatamente recuperada; a de fluência é recuperada após algum tempo; a deformação plástica permanece.

A propriedade do material característica de fluência corresponde à tensão de fluência ou tensão de rotura à fluência σ_f que é a tensão de rotura por fluência a uma determinada temperatura, ao fim de 100.000 horas; outras vezes refere-se o limite de fluência que corresponde, para uma determinada temperatura, à tensão que provoca a deformação de 1% (extensão).

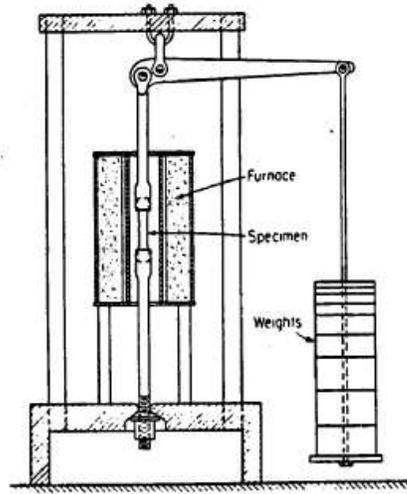
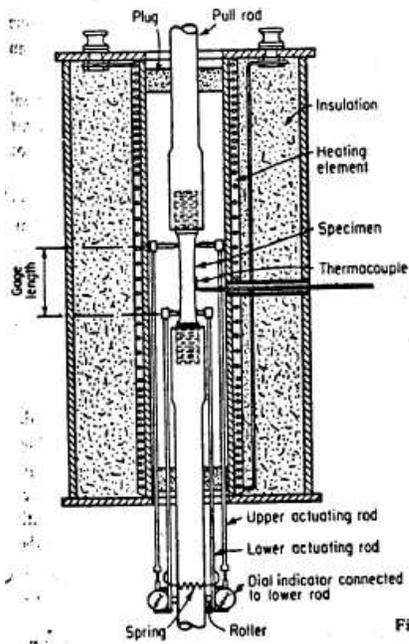


Figure 15.5 Loading apparatus. (From Moore and Moore, Ref. 69.)

Figure 15.6 Electric furnace and extensometer.

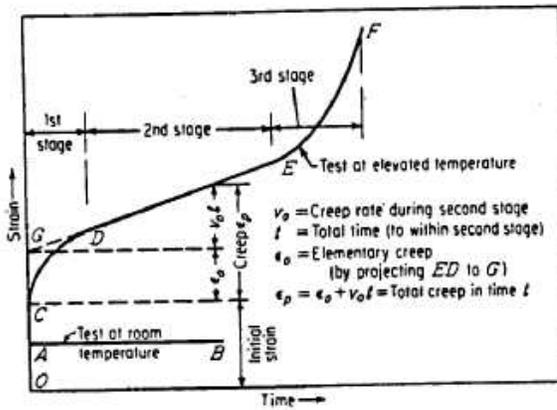


Figure 15.1 Strain-time curves at room and at elevated temperatures.

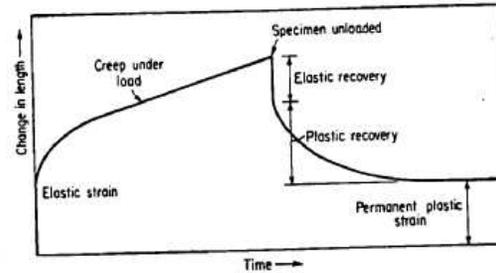


Figure 15.3 Recovery of strain after unloading.

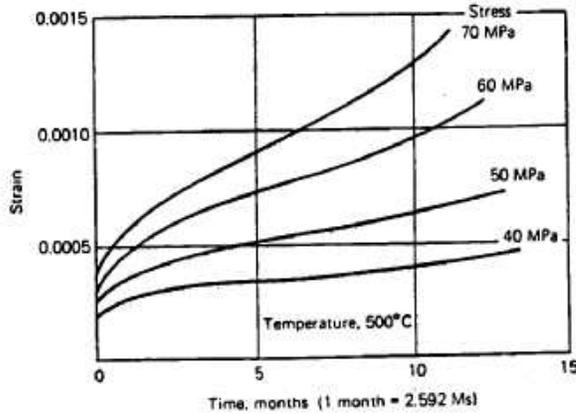
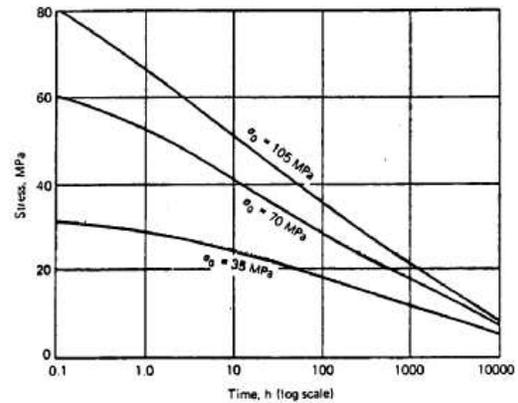


Figure 15.2 Creep curves for a typical carbon steel.



Note: 20 MPa = 2.9 ksi
Figure 15.4 Relaxation of 0.35% carbon steel at 455°C. (From Roberts, Ref. 78.)

3.10 Fadiga

O termo fadiga aplica-se ao fenómeno respeitante às alterações de propriedades dos materiais em resultados de solicitações cíclicas; o termo é sobretudo utilizado para caracterizar os fenómenos que conduzem à fissuração ou à rotura e resultantes de cargas variáveis de natureza cíclica.

Pode-se dizer que a fadiga é o enfraquecimento progressivo de uma peça ou estrutura sujeita a solicitações variáveis e que ao fim de um determinado período conduzem à rotura da peça.

Para solicitações abaixo de um determinado nível de tensões, não ocorrem danos visíveis de fadiga; chama-se a esta zona de segurança e a correspondente tensão mais elevada, a tensão limite da fadiga (σ_D).

A zona de fadiga limitada corresponde a uma zona de fadiga multicíclica onde a tensão de rotura é atingida a um determinado nº de ciclos (σ_{ND}). A zona de fadiga plástica oligocíclica, corresponde a uma zona de solicitações elevadas, em que o mecanismo de fadiga é essencialmente governado por deformações plásticas que se sucedem; a rotura é atingida com valores de número de ciclos relativamente reduzido; neste caso o estudo da resistência à fadiga é estudado através das deformações e não pelas tensões como acontece na fadiga multicíclica.

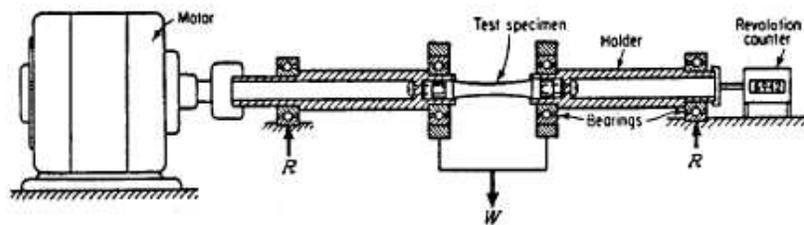


Figure 14.6 R. R. Moore rotating-beam machine.

O diagrama semilogaritmico mais usado para caracterizar a rotura por fadiga é a curva de Wohler ou diagrama S-N; este diagrama caracteriza a fadiga multicíclica.

Estas características do material são afectadas por diversos factores que devem ser tomados em consideração.

Geralmente a curva de Wohler é representativa do comportamento do provete do material no caso de tensões alternadas simétricas $|\sigma_{\max}| = |\sigma_{\min}|$ em que

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1.$$

Para outros casos em que $\sigma_{\text{med}} \neq 0$, há que complementar com o diagrama de Haig-Soderberg ou outro similar, que aparece na literatura da especialidade. Convém referir que sempre que o ensaio de fadiga for feito para $R \neq -1$ tal valor (de R) deverá ser devidamente explicitado.

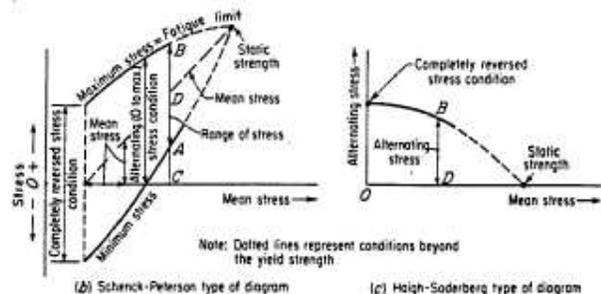
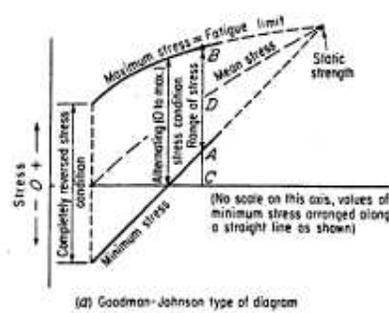
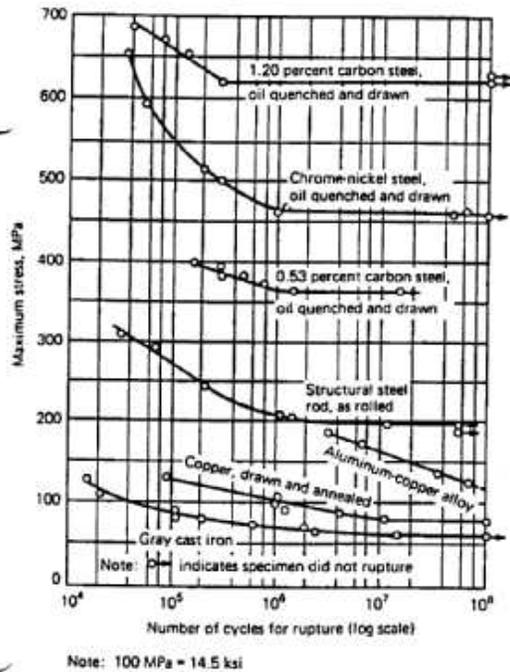


Figure 14.10 General variation of strength with range of stress.

Verifica-se ainda, no caso dos esforços variáveis, que o uso de σ_D não é directo, isto é, existem factores como a temperatura, o acabamento superficial da peça, a dimensão, a concentração de tensões, o grau de incerteza, etc. que influenciam o valor de σ_D , reduzindo-o, uma vez que em situações reais, as solicitações variáveis não são regulares, o uso de sinusóides regulares para estudar a fadiga é uma aproximação; igualmente há que entender o efeito acumulado de danos em situações de carregamentos variáveis bloco a bloco; uma teoria simples que posteriormente tem sido estudada e já apresenta formas diversas, mais complexas é a regra de Miner, onde $\sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$ para evitar a ocorrência de rotura por fadiga. (N_i é o número de ciclos correspondente à rotura a uma determinada tensão; n_i é o número de ciclos a que uma peça se sujeita a essa mesma tensão).

FIGURE 12.5 Characteristic stress–time variations in (a) an engineered structure subject to a positive mean stress on which is superimposed random loading, (b) a rotating beam fatigue test in which the material experiences alternating compressive and tensile stresses of equal magnitude, and (c) a cyclical tension test in which a time-varying sinusoidal stress is imposed on a constant mean stress. The stress range, stress amplitude, and mean stress are designated in (b) and (c).

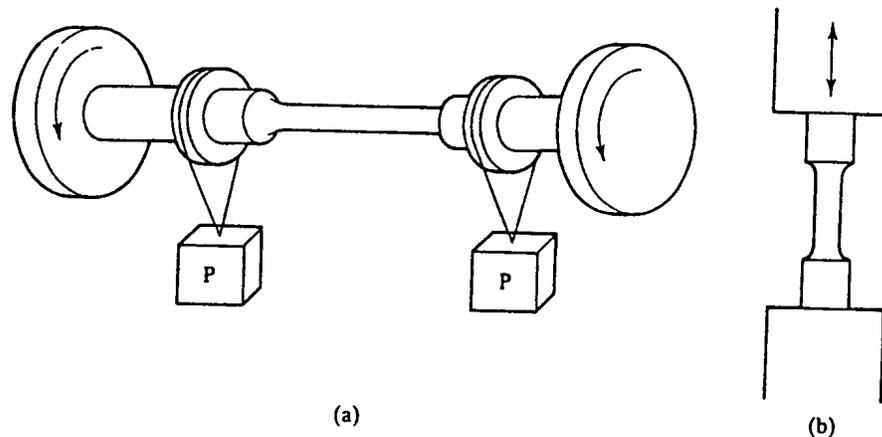
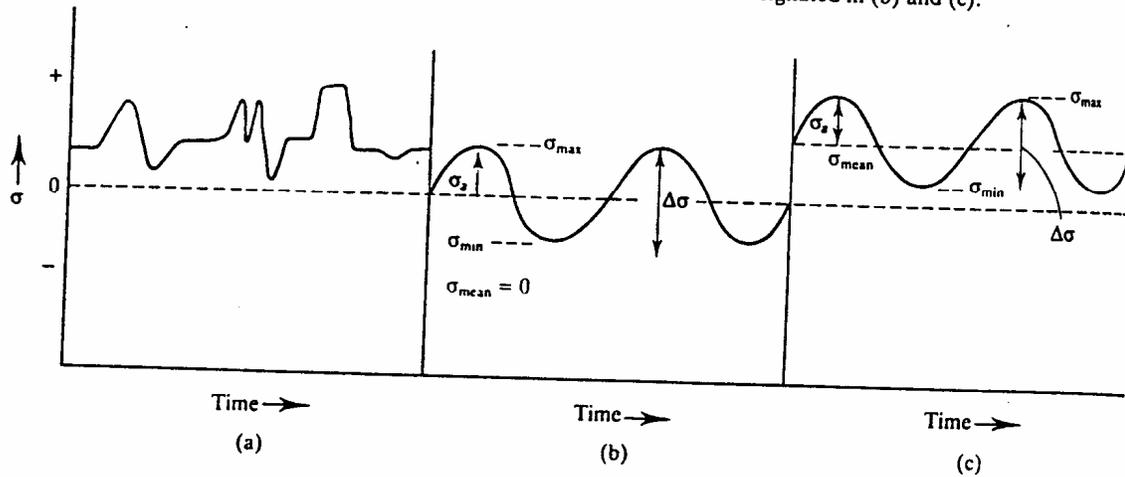


FIGURE 12.6 (a) A rotating-beam fatigue test. A constant load is applied, which results in a constant moment along the gage section of the sample. Rotation of the sample results in a stress–time variation on the surface of the kind shown in Fig. 12.5b; i.e., alternating compression and tension with $R = -1$ and $\sigma_a = \Delta\sigma/2 = \sigma_{max}$. (b) A cyclical tension test simulates fatigue behavior for $R \neq -1$. In this test, a cyclical stress is imposed on a constant mean stress such that the stress varies with time as shown in Fig. 12.5c. (Note: a cyclical tension–compression test with $R < 0$ can also be performed by a test of this type.) (Adapted from R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, Wiley, New York, 1976.)

3.10.1 ESTUDO CONVENCIONAL DA FADIGA

$\sigma_D =$ Tensão limite de fadiga (Endurance Limit)

(tensão limite de resistência à fadiga para o provete de ensaio)

Valor máximo da tensão a que o provete se sujeita, para o qual não há rotura do provete qualquer que seja o número de ciclos (no caso dos aços) ou para o qual a rotura do provete ocorre a valores muito elevados (caso do alumínio), normalmente 10^7 ou 10^8

Tabela 3 Tensão limite de fadiga de diferentes metais*

Metal	Static tensile strength (MPa)	Fatigue limit (MPa)	Fatigue ratio
Steel, 0.18% carbon, hot-rolled	432	213	0.49
Steel, 0.24% carbon, quenched and drawn	465	203	0.44
Steel, 0.32% carbon, hot-rolled	453	216	0.48
Steel, 0.38% carbon, quenched and drawn	631	231	0.37
Steel, 0.93% carbon, annealed	580	210	0.36
Steel, 1.02% carbon, quenched	1382	724	0.51
Nickel steel, SAE 2341, quenched	1944	772	0.40
Cast steel, 0.25% carbon, as cast	463	186	0.40
Copper, annealed	223	69	0.31
Copper, cold-rolled	359	110	0.31
70-30 brass, cold-rolled	505	121	0.24
Aluminium alloy 2024, T36	496	124	0.25
Magnesium alloy AZ63A	276	76	0.27

* Adapted from H. F. Moore and J. B. Kammers, *Fatigue of Metals*, McGraw-Hill, New York, 1927

σ'_D = tensão limite de fadiga corrigida ou modificada para a peça em estudo.

$$\sigma'_D = K_a K_b K_c K_d K_g \sigma_D$$

K_a – Factor de correcção devido ao acabamento (também função de σ_r)

K_b – Factor de correcção geométrico (ou devido às dimensões)

K_c – Factor de fiabilidade (os ensaios são válidos quando a fiabilidade é de 50%)

K_d – Factor de correcção da temperatura

K_g - Factor agregando outros efeitos (choque, corrosão, etc.)

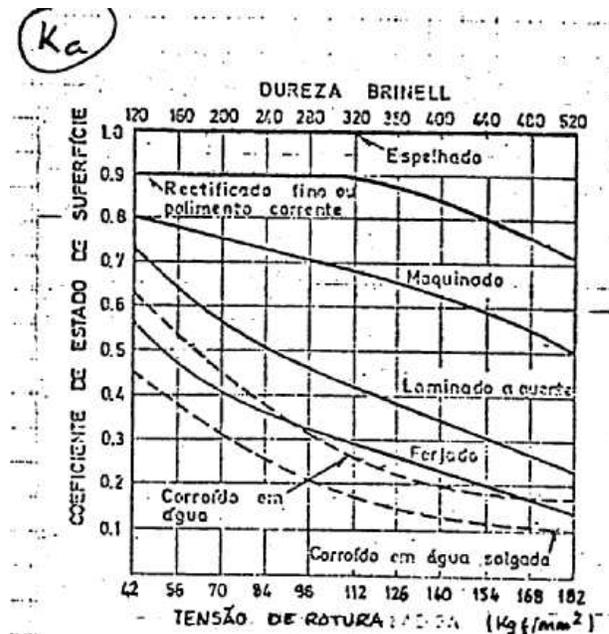
Nota:

$K_e = \frac{1}{K_f}$ afecta directamente as tensões (média e alternada) no caso de materiais frágeis, ou só alternada no caso de matérias dúcteis)

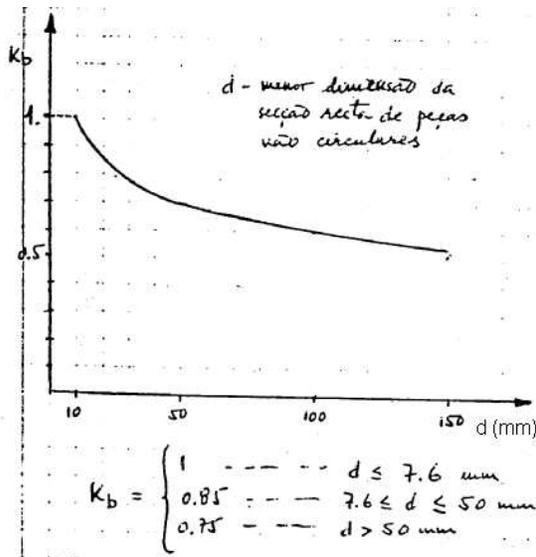
N – vida (número de ciclos)

Factores de correcção da tensão limite de fadiga

Factor de acabamento



Factor de correcção geométrico - K_b



Factor de Fiabilidade - K_c

K_c	Fiabilidade
1	0.5000
0.897	0.9000
0.868	0.9500
0.814	0.9900
0.753	0.9990
0.702	0.9999

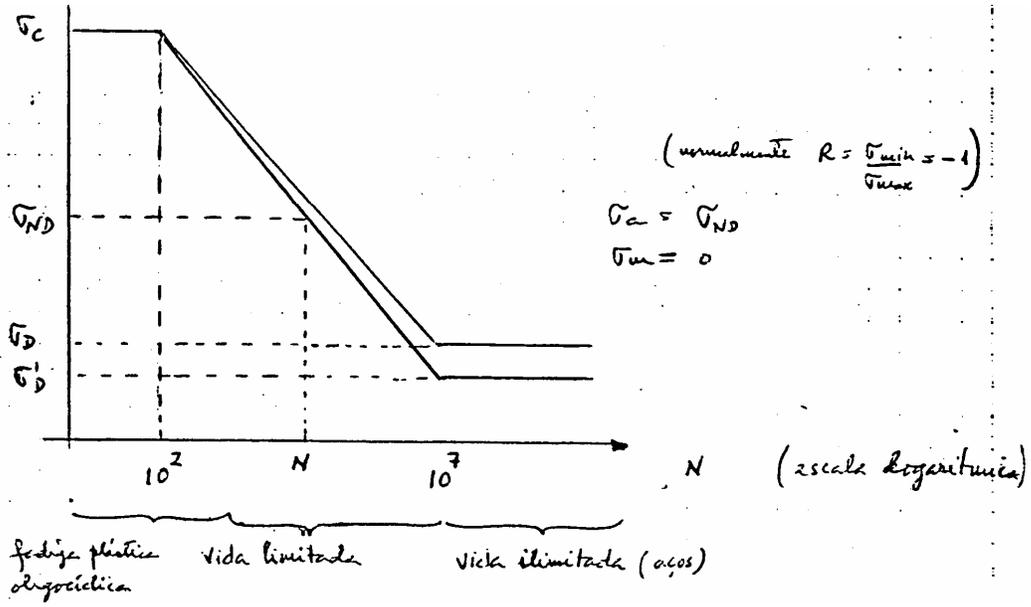
Factor de correcção da temperature - K_d

$$K_d = \frac{344}{273+T} \quad \text{para}$$

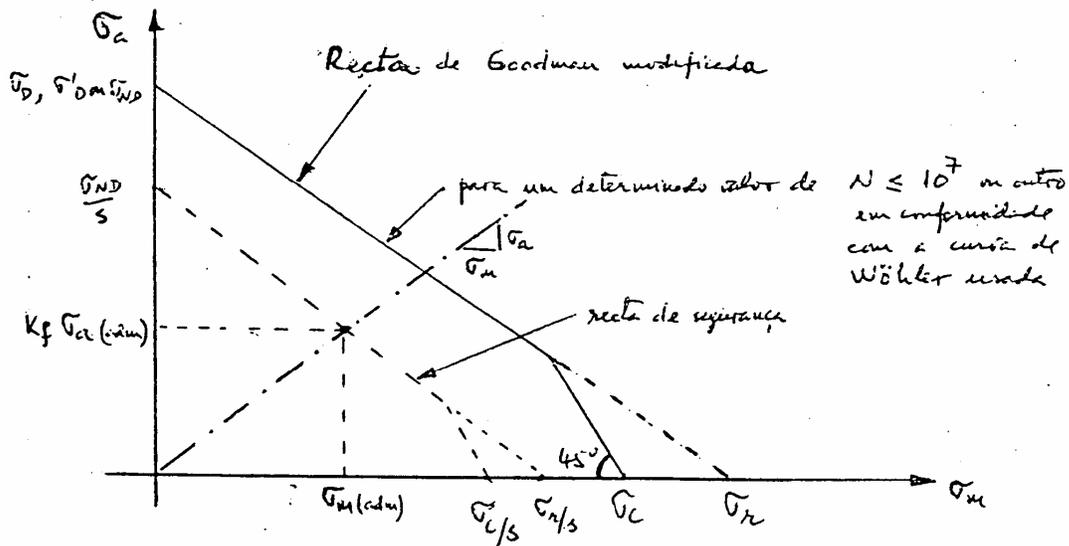
$T > 70^\circ\text{C}$

para $T < 70^\circ\text{C}$ tem-se $K_d = 1$

Curva de Wohler



$$\frac{\sigma_{ND} - \sigma_D}{\log 10^7 - \log N} = \frac{\sigma_c - \sigma_D}{\log 10^7 - \log 10^2}$$



$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

e

$$\frac{1}{s} = \frac{\sigma_{m(adm)}}{\sigma_r} + \frac{k_f \sigma_{a(adm)}}{\sigma_{ND}}$$

CICLOS DE TENSÃO

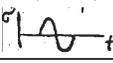
σ_{\max} σ_{\min} ciclo	Solic. alt. simétricas $|\sigma_{\max}| = |\sigma_{\min}|$	Solic. alt. assimétricas $0 < \sigma_m < \sigma_a$ 	Solicitações repetidas $\sigma_{\min} = 0$ 	Solicitações onduladas $\sigma_m > \sigma_a$ 
Tensão média $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$	0		$\frac{\sigma_{\max}}{2}$	
Tensão alternada $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$	σ_{\max}		$\frac{\sigma_{\max}}{2}$	
Tensão de zona $\sigma_{zona} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a$	$2\sigma_{\max}$		$2\sigma_{\max}$	
Razão tens. min / tens. max $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$	-1	$] -1, 0[$	0	$] 0, 1[$
Razão tens. alt / tens. méd $A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$	∞	> 1	1	< 1

FIGURE 12.5 Characteristic stress–time variations in (a) an engineered structure subject to a positive mean stress on which is superimposed random loading, (b) a rotating beam fatigue test in which the material experiences alternating compressive and tensile stresses of equal magnitude, and (c) a cyclical tension test in which a time-varying sinusoidal stress is imposed on a constant mean stress. The stress range, stress amplitude, and mean stress are designated in (b) and (c).

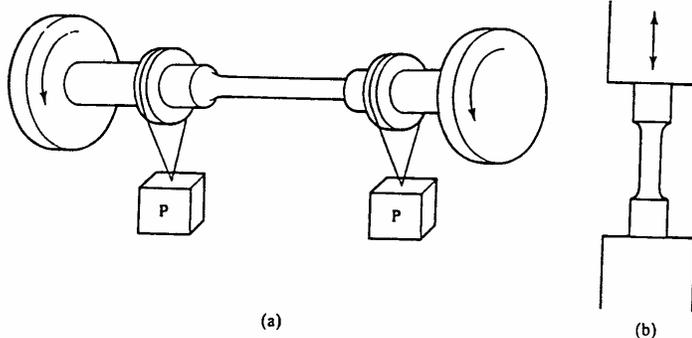
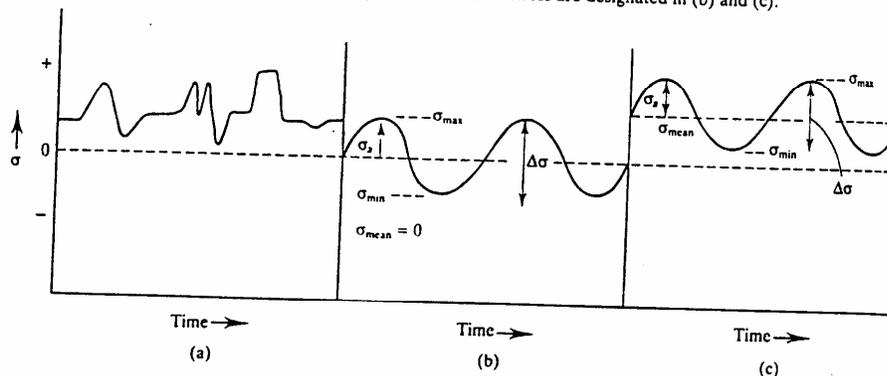
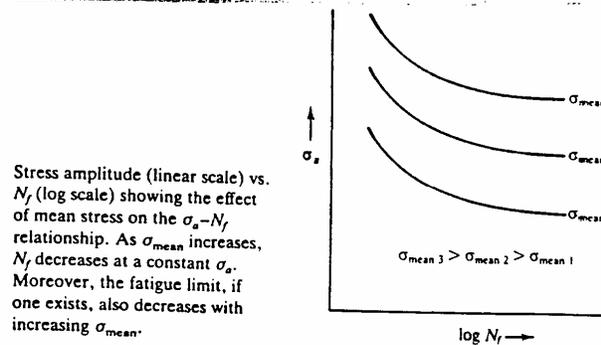
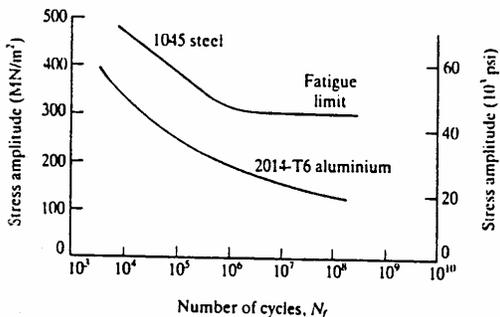


FIGURE 12.6 (a) A rotating-beam fatigue test. A constant load is applied, which results in a constant moment along the gage section of the sample. Rotation of the sample results in a stress–time variation on the surface of the kind shown in Fig. 12.5b; i.e., alternating compression and tension with $R = -1$ and $\sigma_a = \Delta\sigma/2 = \sigma_{max}$. (b) A cyclical tension test simulates fatigue behavior for $R \neq -1$. In this test, a cyclical stress is imposed on a constant mean stress such that the stress varies with time as shown in Fig. 12.5c. (Note: a cyclical tension–compression test with $R < 0$ can also be performed by a test of this type.) (Adapted from R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, Wiley, New York, 1976.)

Stress amplitude–number of cycles to failure relationships for a 1045 steel and an aluminum alloy. The steel manifests a fatigue limit, whereas the 2014-T6 aluminum alloy does not. The data for this figure were obtained for a mean stress of zero. (Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffat, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, Wiley, 1965.)



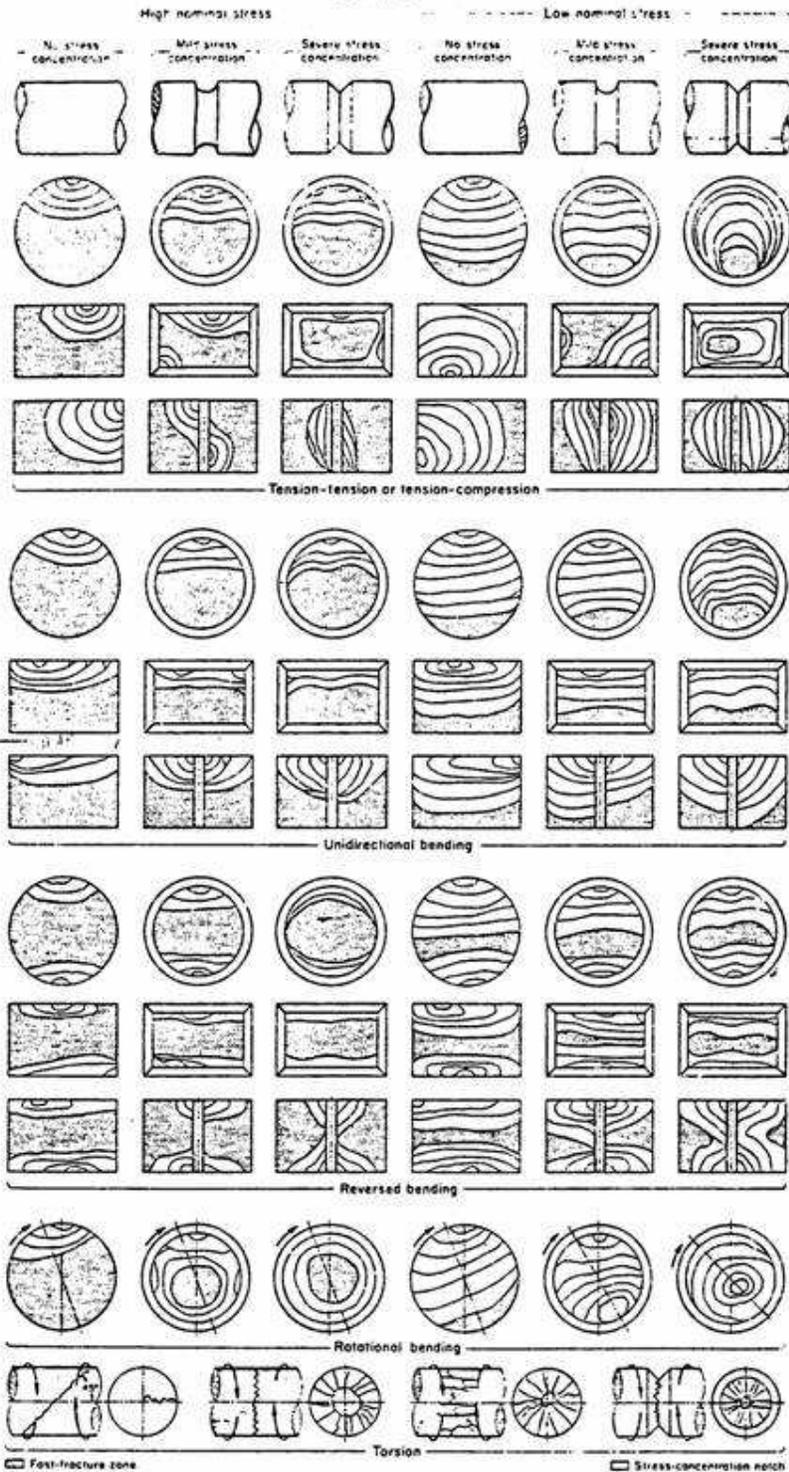


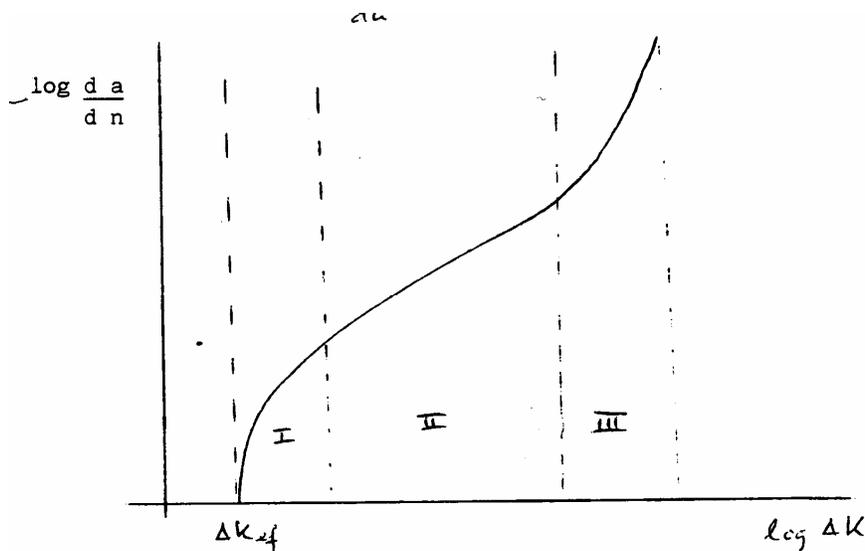
Fig. 12. Schematic representation of marks on surfaces of fatigue fractures produced in smooth and notched stresses with round, square and rectangular cross sections, and in thick plates, under various loading conditions at high and low nominal stress

3.10.2 Utilização da mecânica da fractura linear elástica nos estudos de fadiga

Além do estudo da fadiga pelo processo convencional, os conceitos da MFLE podem ser aplicados ao estudo da fadiga, na suposição que existem sempre defeitos que

mediante determinadas condições crescem de dimensão podendo num determinado momento permitir a rotura. A forma mais convencional de estudar este tópicó é através da lei de Paris $\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^m$.

Esta relação empírica relaciona a velocidade de propagação da fenda $\frac{da}{dn}$ com a variação do factor de intensidade de tensões ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$), para um determinado material caracterizado pelas constantes C e m. A rotura ocorre quando K_{max} atinge K_c . Os valores de K_{max} e K_{min} estão relacionados com as tensões máxima e mínima resultantes das solicitações variáveis aplicadas à peça. Existe um valor ΔK_{ef} (ΔK_{th}) que corresponde ao limiar de propagação da fenda, isto é, abaixo deste valor não há propagação da fenda. A lei de Paris representa-se da seguinte forma na zona II (relação de proporcionalidade directa entre $\log \frac{da}{dn}$ e $\log \Delta K$).



A velocidade de propagação da fenda é especialmente influenciada por:

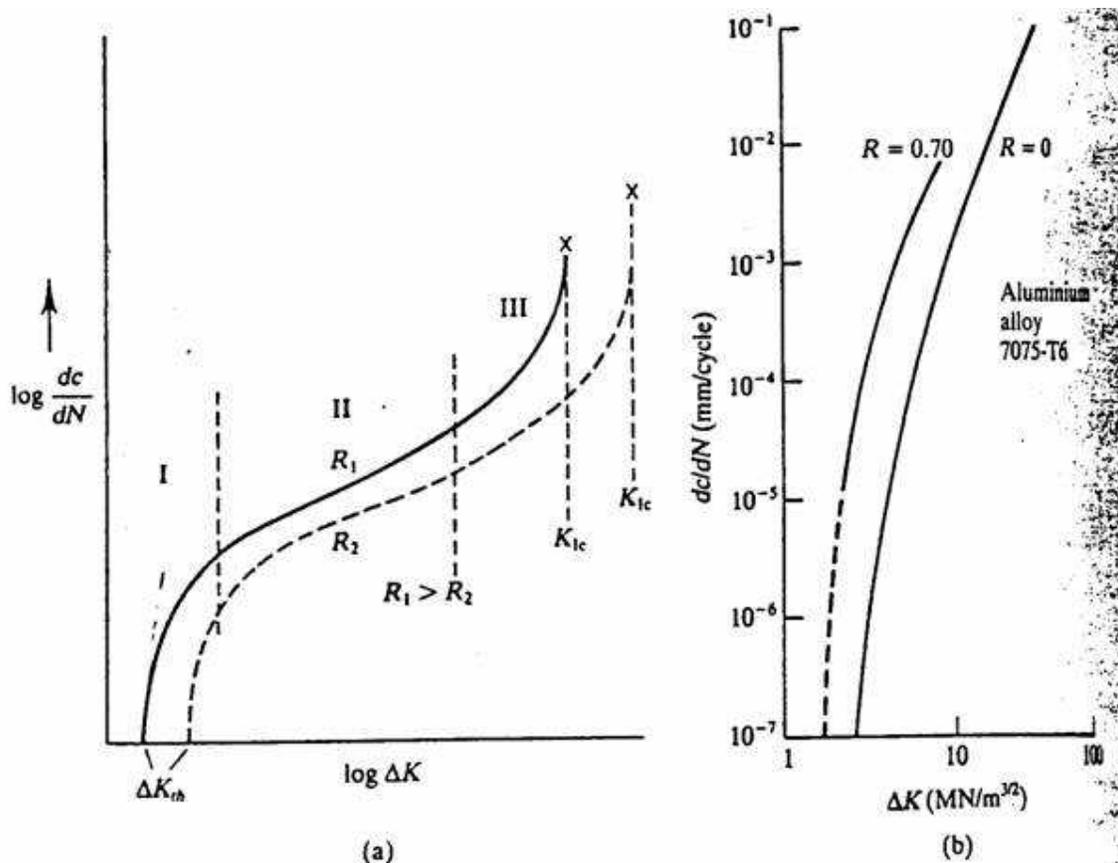
- material e seu tratamento térmico
- meio ambiente
- tensão média
- frequência
- espessura
- história da carga

Convém notar mais uma vez que a lei de Paris apenas traduz o comportamento da zona II. Uma outra equação que descreve o efeito da tensão média nos regimes II e III é a equação de Forman

$$\frac{da}{dn} = \frac{A(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K}$$

onde A e m são constantes que dependem do material, frequência e meio ambiente.

A utilização dos conceitos da Mecânica da Fractura tem uma verdadeira aplicação prática na indústria na medida em que o a inicial pode ser o valor do mínimo defeito detectável, isto é, há que garantir que a existência de um defeito não detectado não põe em perigo a estrutura.



(a) Schematic of crack-growth rate as a function of the cyclical stress intensity factor $\Delta K (= \alpha \Delta \sigma c^{1/2})$ for different R values. At very low ΔK values, dc/dN becomes very small; so much so, in fact, that ΔK_{th} , a stress-intensity factor below which Stage II cracks will not propagate, can be identified. As R is increased, ΔK_{th} decreases. In Region II the crack-growth rate - ΔK relationship is described by the power-law equation (12.5), which yields a straight line on the logarithmic coordinates of this figure. As in Region I, dc/dN increases with R , but in Region II, dc/dN is less sensitive to R than in Region I. Crack-growth rates are quite sensitive to R during Region III, where high ΔK values promote rapid Stage II crack-growth rates. Fracture (marked by \times) takes place when $K_{max} = K_{Ic}$; clearly, for a given stress amplitude, K_{Ic} decreases as R increases. (Alternatively, final fracture may take place by tensile separation.) (b) dc/dN vs. ΔK for the 7075 aluminum alloy in the T6 condition. Although the three regions schematized in (a) are not clearly evident in this figure, there is no doubt that increasing R values reduce ΔK_{th} and increase dc/dN at all values of ΔK . (Data from C. M. Hudson, NASA TN D5390, 1969.)

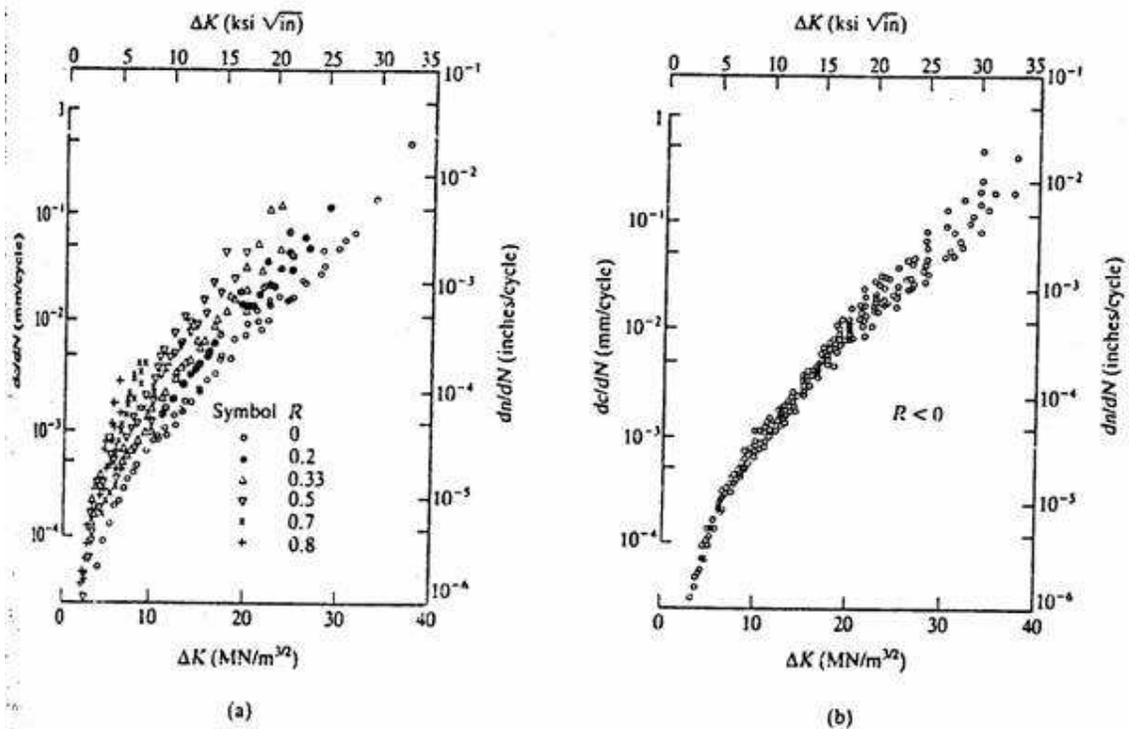


FIGURE 12 17 Fatigue-crack growth rate $-\Delta K$ relationships in 7075-T6 aluminum alloys as affected by the stress ratio for (a) $R > 0$ and (b) $R < 0$. When R is positive, dc/dN increases with stress ratio at a fixed stress amplitude. Conversely, when $R < 0$, dc/dN depends primarily on ΔK and only secondarily on R . Indeed, stress ratio only has an obvious effect on dc/dN in Region III, where crack advance often takes place by ductile rupture, in which case σ_{\max} (or K_{\max}) plays a dominant role in determining fatigue-crack growth rates. (Data from C. M. Hudson, NASA TN D5200, 1960.)

4 CORROSÃO

4.1 SUMÁRIO

Introdução

- Definição
- Importância económica e social
- Influência na segurança e na robustez
- Associação com diversos aspectos do comportamento mecânico
- Formas de corrosão

Mecanismos de corrosão electroquímica

- Sobretensões
- Polarização

Agentes e factores influentes na corrosão

- Oxigénio
- Salinidade e agentes redutores
- Movimento dos líquidos
- PH
- Temperatura
- Fotossíntese
- Agentes biológicos
- Tamanho relativo das superfícies do ânodo e do cátodo

Protecção anticorrosiva

- Escolha dos materiais
- Inibidores e alterações do meio ambiente
- Protecção catódica
- Protecção anódica (passivação – barreira)
- Revestimentos
 - Metálicos
 - Plásticos
 - Tinhas

Protecção conjugada

- Compatibilidade

Isolamento eléctrico

Séries

- Electroquímica
- Galvânica na água salgada

4.2 Introdução

A corrosão representa uma forma complexa de deterioração dos materiais, devido à reacção química, ou electroquímica desses mesmos materiais com o meio ambiente onde se situam. No sentido mais lato, podemos dizer que a corrosão é toda a deterioração de materiais por outros meios que não sejam os de acção puramente mecânica. Num âmbito mais restrito, a corrosão é um fenómeno associado a uma

reacção química ou electroquímica (geralmente sob a forma de oxidação) dos metais ou ligas com o ambiente em que se encontram.

Estas reacções correspondem a uma transição para uma forma energética mais estável e correspondem ao fecho do ciclo de utilização do metal, iniciado pela recolha do minério, seguido do seu processamento metalúrgico de base, obtenção do metal ou liga em forma industrialmente utilizável e seu uso; a deterioração por corrosão faz regressar o metal a um composto que poderia ser originalmente obtido no minério.

O estudo e a compreensão dos mecanismos de corrosão tem muito interesse para os que se dedicam quer à regulamentação, quer ao projecto ou à utilização de instalações industriais, nomeadamente de construções metálicas, pois em todas essas fases é necessário conhecer os efeitos dessa forma de deterioração dos metais e das suas propriedades nos sistemas em questão.

Os efeitos da corrosão afectam o modelo económico do sistema, pois avarias inesperadas e consequentes reparações, immobilizações da instalação, desgastes, degradação da qualidade do produto produzido, reduções de rendimento, substituição de componentes, etc., pesam negativamente na exploração desse sistema. Todos estes aspectos se sentem de forma significativa na rentabilidade de um empreendimento.

Do mesmo modo, para se ter em conta os efeitos da corrosão, o dimensionamento é efectuado com margens que garantam uma exploração sem falhas. O desconhecimento dos mecanismos de corrosão, a escolha deficiente de materiais, a ausência de tratamentos de protecção anticorrosiva ou a sua escolha deficiente ou aplicação levam a um incremento no sobredimensionamento e nos factores de segurança, que necessariamente se reflecte no preço da instalação e nos custos da sua exploração.

Mais importantes são os efeitos das avarias resultantes da corrosão, na segurança humana e material, no património das matérias primas e sobretudo tudo no equilíbrio ecológico em redor do sistema avariado.

Podemos pois dizer que a corrosão tem implicações económicas, de segurança, de conservação de recursos e de natureza ecológica.

Embora os mecanismos de corrosão estejam estabelecidos para tecnologias tradicionais, em novas indústrias e na utilização de novos materiais em ambientes altamente corrosivos e sujeitos a grandes esforços, apareceram novos campos para a investigação aplicada dos efeitos da corrosão e das maneiras de os evitar ou controlar. Assim, a par do prosseguimento da investigação de corrosão em materiais tradicionais, é grande o esforço que se está a desenvolver no que respeita a aplicações de novos materiais em bio-engenharia, electrónica, instalações petroquímicas, turbinas a gás, instalações de energia nuclear, condutas de transporte de ramos e gás natural (pipelines), plataformas oceânicas fixas, etc.

No que respeita a navios e outras plataformas oceânicas móveis, é evidente que o conhecimento do comportamento dos materiais em relação a um ambiente tão hostil como o mar e a atmosfera marítima, é necessário aos técnicos que estão relacionados com as estruturas e os equipamentos instalados a bordo.

4.3 CORROSÃO ELECTROQUÍMICA

4.3.1 Definição e Objectivos

Entende-se por corrosão o ataque destrutivo dum metal por meio duma reacção química ou electroquímica que se estabelece entre ele e o meio ambiente.

Segundo este ponto de vista, a deterioração dum material devido a causas físicas não deve ser considerada corrosão mas sim erosão, abrasão ou desgaste.

O estudo da corrosão que se vai fazer tem por fim pôr em relevo os principais parâmetros postos em jogo, o que nos permite:

- compreender o papel dos revestimentos e os processos de controlar a corrosão
- tirar partido das causas que originam a corrosão para efectuar decapagens, polimentos, e anodizações.

4.3.2 Mecanismos electroquímicos

4.3.3 Analogia com a pilha seca. Lei de Faraday

A pilha seca (utilizada frequentemente em lanternas) é formada por um eléctrodo central de carvão, por um eléctrodo de zinco que serve de recipiente e por um electrólito, que é essencialmente uma solução de Cl NH_4^+ , que separa os dois eléctrodos.

No eléctrodo de carvão (polo positivo) tem lugar uma redução química e no eléctrodo de zinco (polo negativo) uma oxidação química na qual o zinco metálico é convertido em iões de zinco hidratados $\text{Zn}^{++} \cdot n\text{OH}_2$. Quanto maior é o fluxo de electricidade através da pilha, maior é a quantidade de zinco que se corrói. Faraday demonstrou que a quantidade de zinco consumida nesta reacção e dada por:

$$\text{Peso de metal consumido} = K \cdot I \cdot t$$

t - tempo

I - intensidade de corrente

K - equivalente electroquímico

Esta equação é válida quando temos um circuito eléctrico que se fecha através da pilha. Se este circuito estiver aberto (interrompido) pareceria que a pilha não se gastaria pois nesse caso a intensidade de corrente I seria nula e portanto pela lei de Faraday não haveria consumo de zinco. No entanto, devido à presença de impurezas no zinco, existem pontos na superfície do zinco que funcionam como se fossem eléctrodos de carvão dando origem ao aparecimento de pilhas de acção local, cujos bornes estão neste caso em curto circuito, circulando então entre estes pontos uma pequena corrente local que irá deteriorando a superfície do zinco. Esta corrente local não produz energia útil indo unicamente aquecer o zinco.

O que se passa no caso do zinco passa-se duma maneira geral com todos os metais, isto é, todos os metais possuem pontos que podem ser considerados eléctrodos positivos e negativos que estão, desse modo, em curto circuito.

Quando o metal está seco não se observa nenhuma corrente de acção local por ausência do electrólito que permite a formação de pilhas de acção local. No entanto ao colocar o metal na água ou em soluções aquosas, começam a funcionar as pilhas de acção local que vão dar origem à conversão do metal em produtos de corrosão.

Mesmo no caso de metais puros existe sempre corrosão, mas provocada por outros mecanismos, como veremos mais adiante.

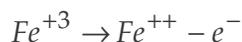
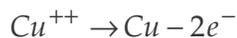
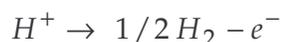
4.3.4 Definição de cátodo e ânodo

Como vimos acima, para que exista uma pilha é necessária a presença dum electrólito, isto é, duma solução em que os seus elementos se achem decompostos em iões positivos e negativos. A corrente é então transportada por estes iões e depende da sua mobilidade. A corrente no electrólito equilibra exactamente a corrente electrónica no circuito exterior, o que nos leva a dizer que a lei de Ohm é extensível ao caso de electrólitos.

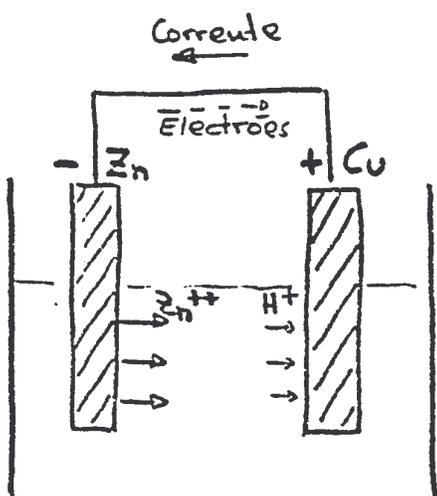
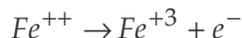
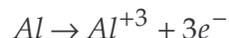
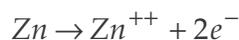
No estudo da electroquímica costuma-se empregar como sentido da corrente o que corresponde a um movimento de cargas positivas e não de electrões. Deste modo o sentido da corrente exterior na pilha descrita anteriormente corresponde ao transporte de cargas positivas do polo positivo para o negativo.

Com base neste sentido convencional da corrente pode-se definir cátodo e ânodo duma maneira simples, sem se ter que atender à natureza dos eléctrodos (positivo ou negativo).

O eléctrodo no qual tem lugar uma redução química (o eléctrodo em que entra corrente positiva do electrólito) chama-se cátodo. Reacções catódicas são do tipo:



O eléctrodo no qual tem lugar uma oxidação química (o eléctrodo em que sai corrente positiva para o electrólito) chama-se ânodo. Reacções anódicas são do tipo:



É no ânodo que aparecem as corrosões visto ser nele que se dão as oxidações químicas. A corrosão no cátodo está ligada a reacções secundárias que se dão entre esse eléctrodo e os produtos que nele se vão depositar.

Convém frisar que é o tipo de reacções que se dão nos eléctrodos que determina se um eléctrodo é cátodo ou ânodo. Assim, no caso duma pilha galvânica, o cátodo é o polo positivo e o ânodo o polo negativo. No entanto se aplicar corrente a uma pilha deste tipo, como acontece nos processos tecnológicos de revestimentos electrolíticos, a redução realiza-se no eléctrodo ligado ao pólo negativo e então é este que funciona como cátodo.

Entende-se por catiões os iões que se dirigem para o cátodo quando flui electricidade, através da pilha (H^+ , Fe^{++}) e são sempre carregados positivamente. Os aniões pelo contrário têm sempre carga negativa Cl^- , OH^- , SO_4^- .

4.3.5 Tipos de pilhas

Nos fenómenos de corrosão estão implicados três tipos de pilhas que se irão descrever brevemente a seguir.

4.3.5.1 *Pilhas de eléctrodos diferenciais*

Estas pilhas são do tipo da pilha seca descrita anteriormente.

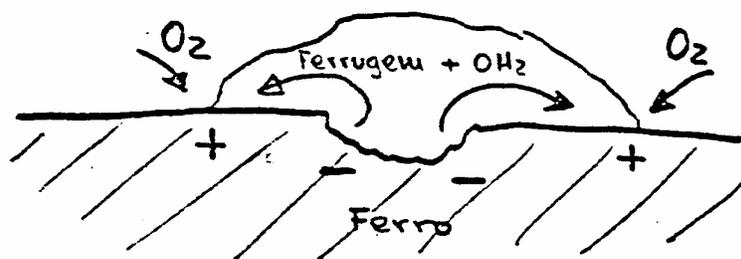
Outros tipos de pilhas de eléctrodos diferenciais são:

- metal sujeito a um trabalho a frio em contacto com o mesmo metal mas recozido.
- espaços das uniões intergranulares em contacto com os grãos
- um cristal dum único metal em contacto com outro de orientação diferente.

4.3.5.2 *Pilhas de concentração*

Neste tipo de pilha os dois eléctrodos são idênticos mas cada um deles está em contacto com uma solução de composição diferente. Existem duas espécies de pilhas de concentração:

- Pilha de concentração salina: um exemplo desta pilha é aquela em que os dois eléctrodos de cobre estão um mergulhado numa solução concentrada de sulfato de cobre e o outro numa solução diluída também de sulfato de cobre. Neste caso o eléctrodo da solução diluída funciona como ânodo e o outro como cátodo, estabelecendo-se uma corrente que tende a igualar a diluição das duas soluções.
- Pilha de arejamento diferencial: exemplo desta pilha é aquela em que temos dois eléctrodos de ferro em contacto com soluções de cloreto de sódio de diluição idêntica mas em que um dos eléctrodos é insuflado ar e no outro é insuflado azoto. A diferença de arejamento vai dar origem ao estabelecimento de uma pilha em que o eléctrodo em contacto com o ar funciona como cátodo e o outro como ânodo. Uma pilha deste tipo muito importante é a que origina o aparecimento de pontos de ferrugem. Para ficarmos desde já com uma ideia deste tipo de corrosão analisemos o esquema abaixo.



4.3.5.3 Pilhas de temperatura diferencial

Nestas pilhas os eléctrodos são do mesmo metal, estando no entanto cada um deles a temperatura diferente; o electrólito tem a mesma composição inicial.

A teoria que explica o funcionamento destas pilhas está ainda muito pouco desenvolvida, não existindo no entanto qualquer relação entre a temperatura e a polaridade dos eléctrodos. Assim no caso duma solução de $CuSO_4$ o eléctrodo mais quente funciona como cátodo e o mais frio como ânodo, enquanto que no caso da prata as polaridades já são diferentes e no caso do ferro em contacto com soluções de cloreto de sódio a polarização pode ser invertida a meio do processo de corrosão.

Este tipo de corrosão é especialmente importante no caso de permutadores, caldeiras e equipamentos similares.

4.4 Tipos de corrosão

Os cinco tipos principais de corrosão tendo em atenção as alterações que causam nas propriedades físicas dos metais ou as alterações externas a que dão origem, são os seguintes:

4.4.1 Ataque uniforme

Neste caso a profundidade de corrosão é muito semelhante em toda a superfície das peças. Existem dois processos de quantificar este tipo de corrosão:

- Profundidade de penetração por ano
- Miligramas por decímetro quadrado por dia

Como em geral este tipo de corrosão não apresenta uma velocidade uniforme (a velocidade é em geral maior no começo do processo de corrosão) convém sempre especificar o tempo de exposição ao ambiente corrosivo.

Consoante o valor da profundidade de penetração por ano, os metais em conflito com substâncias químicas costumam ser classificados em três categorias:

- <0,13 mm/ano: boa resistência à corrosão. Indicados para peças de responsabilidade
- de 0,13 a 1,3 mm/ano: resistência média à corrosão. Metais para depósitos, tubagens, corpos de válvulas, etc.

- >1,3 mm/ano: resistência à corrosão numa maneira geral tão reduzida que torna estes materiais de utilização duvidosa.

4.4.2 Pontos de corrosão

Este tipo de corrosão é caracterizado por uma corrosão profunda em pontos isolados. Isto é devido à transformação em ânodos de pontos iniciais de corrosão o que vai provocar o seu maior desgaste em relação às partes ainda sãs.

Este tipo de corrosão é quantificado através do factor de picagem definido por p/d = profundidade dos pontos de corrosão/profundidade do ataque uniforme.

Existem dois tipos um pouco particulares de pontos de corrosão:

- *corrosão por atrito*: dá-se no caso de dois metais em contacto sujeitos a uma vibração que os faz ter movimento relativo de pequena amplitude (fretagem)
- *cavitação*: dá-se no caso dos impulsores de bombas ou nas superfícies posteriores das pás dos hélices, tendo origem na formação de bolhas de vapor que colapsam devido a fenómenos de descompressão.

4.4.3 Corrosão selectiva

Dá-se no caso de ligas (por exemplo nas ligas *Cu-Zn*) e consiste na corrosão dum dos metais da liga preferencialmente aos outros dando assim origem a peças com a mesma forma geométrica mas de resistência mecânica reduzida visto que o metal que não se corroeu forma um corpo poroso na ausência do metal que não resistiu à corrosão.

4.4.4 Corrosão Intergranular

A corrosão intergranular é um tipo de corrosão localizado que aparece nos espaços que limitam os grãos dum metal e que produz uma perda de resistência mecânica e ductilidade. O material que forma os espaços intergranulares, e que actua como ânodo, está em contacto com as superfícies dos grãos que são maiores e actua como cátodos.

4.4.5 Formação de fissuras

Se um metal forma fissuras quando está sujeito a tensões de tracção repetidas ou alternativas, num meio corrosivo, diz-se que o material rompe por corrosão por fadiga. Isto é devido a que um material testado num meio não corrosivo, sendo as tensões aplicadas inferiores ao limite de fadiga, não rompe mesmo com um número infinito de ciclos. Se o mesmo teste for feito num meio corrosivo, qualquer tensão aplicada vai provocar a ruptura ao fim dum certo número de ciclos.

Existe outro tipo de corrosão por fissuração cuja causa é a aplicação de tensões a um material num ambiente corrosivo o que origina a ruptura imediata ou após um esforço continuado. Chama-se a este tipo de ruptura, ruptura por corrosão sob tensão.

4.5 Série Electroquímica e Série Galvânica

A série electroquímica é uma disposição ordenada dos potenciais normais de oxidação ou de redução de todos os metais.

Para construir esta série foi necessário definir um eléctrodo padrão - eléctrodo normal de hidrogénio - e medir os potenciais das pilhas formadas por este padrão e por cada um dos metais na sua forma pura e activa (máximo de actividade electroquímica).

Os valores dos potenciais de oxidação mais positivos ou os valores dos potenciais de redução mais negativos correspondem aos metais mais reactivos, isto é, correspondem aos metais que têm tendência a ser o ânodo no caso de pilhas galvânicas.

A importância da série electroquímica não é no entanto tão grande como seria de esperar à primeira vista, uma vez que sucedem os seguintes fenómenos:

alguns metais têm tendência, especialmente quando colocados em meios oxidantes, a formar películas superficiais específicas. Estas películas deslocam o potencial de oxidação para a zona dos metais mais nobres indo impedir a corrosão. Este fenómeno é conhecido por passivação;

a série electroquímica compreende unicamente os metais puros. Deste modo é impossível prever qual a polarização que se vai estabelecer entre duas ligas conhecidas.

Devido às limitações apontadas foi necessário estabelecer tabelas de índole mais prática de modo a poder-se estudar a corrosão de ligas em contacto com electrólitos conhecidos. Apresenta-se a título de exemplo a série galvânica em água do mar.

Ao contrário do que, se passa com a série electroquímica, na série galvânica entram ligas bem definidas aparecendo algumas delas mais que uma vez; quando isto acontece, uma das ligas corresponde ao estado activo e a outra ao estado passivo.

Quanto mais afastados na série galvânica estiverem duas ligas maior será o potencial de corrosão entre os dois eléctrodos (em circuito aberto). Quando se fecha o circuito vai haver uma corrente que tenderá a polarizar um ou ambos os eléctrodos, como veremos posteriormente, pelo que a consulta da série galvânica também não nos dá resultados definitivos.

SÉRIE ELECTROQUÍMICA

Reacção do Eléctrodo	Potencial normal de oxidação E° (Volt) a 25° C
Li = Li ⁺ + e ⁻	3,05
K = K ⁺ + e ⁻	2,93
Ca = Ca ⁺⁺ + 2e ⁻	2,87
Na = Na ⁺ + e ⁻	2,71
Mg = Mg ⁺⁺ + 2e ⁻	2,37
Be = Be ⁺⁺ + 2e ⁻	1,85
U = U ⁺³ + 3e ⁻	1,80
Hf = Hf ⁺⁴ + 4e ⁻	1,70
Al = Al ⁺³ + 3e ⁻	1,66
Ti = Ti ⁺⁺ + 2e ⁻	1,63
Zr = Zr ⁺⁴ + 4e ⁻	1,53
Mn = Mn ⁺⁺ + 2e ⁻	1,18
Nb = Nb ⁺³ + 3e ⁻	aprox. 1,1
Zn = Zn ⁺⁺ + 2e ⁻	0,763
Cr = Cr ⁺³ + 3e ⁻	0,74
Ga = Ga ⁺³ + 3e ⁻	0,53
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
Fe = Fe ⁺⁺ + 2e ⁻	0,440
Cd = Cd ⁺⁺ + 2e ⁻	0,403
In = In ⁺³ + 3e ⁻	0,342
Tl = Tl ⁺ + e ⁻	0,336
Co = Co ⁺⁺ + 2e ⁻	0,277
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
Ni = Ni ⁺⁺ + 2e ⁻	0,250
Mo = Mo ⁺³ + 3e ⁻	aprox. 0,2
Sn = Sn ⁺⁺ + 2e ⁻	0,136
Pb = Pb ⁺⁺ + 2e ⁻	0,126
H ₂ = 2H ⁺ + 2e ⁻	0,000
Cu = Cu ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,337
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
2Hg = Hg ₂ ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,789
Ag = Ag ⁺ + e ⁻	-0,800
Pd = Pd ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,987
Hg = Hg ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,854
Pt = Pt ⁺⁺ + 2e ⁻	aprox. -1,2
Au = Au ⁺³ + 3e ⁻	-1,50

SÉRIE GALVANICA EM ÁGUA DO MAR

- Magnésio
- Ligas de magnésio
- Zinco

- Alumínio 52-SH
- Alumínio 4-S
- Alumínio 3-S

- Alumínio 2-S
- Alumínio 52-S-T

- Alumínio 17 S-T
- Alumínio 17 S-T
- Alumínio 24 S-T

- Aço macio
- Ferro forjado

Fundição

- Ni-Resistente
- Aço inoxidável 13% de cromo tipo 410 (activo)
- Soldadura 50-50 chumbo-estanho
- Aço inoxidável 18-8, tipo 304 (activo)
- Aço inoxidável 18-8,3% de Mo, tipo 316 (activo)
- Chumbo
- Estanho
- Metal Muntz
- Bronze manganês
- Bronze naval

- Níquel (activo)
- 76% Ni, 16% Cr, 7% Fe (Inconel) (activo)
- Latão amarelo
- Bronze alumínio
- Latão vermelho
- Cobre
- Bronze silício
- 5% Zn-20% Ni e resto Cu (Ambrac)
- 70% Cu-30% Ni
- 88% Cu-2% Zn-10% Sn (composição do bronze G)
- 88% Cu-3% Zn-6,5% Sn-1,5% Pb (composição do bronze M)
- Níquel (passivo)
- 76% Ni-16% Cr 7% Fe (Inconel) (passivo)
- Aço inoxidável 18-8 tipo 304 (passivo)

4.6 Polarização e Velocidades de Corrosão

4.6.1 Polarização

No capítulo anterior estudamos o equilíbrio entre os metais e o meio, conseguindo quantificar a tendência para a corrosão. No entanto, na prática, o que nos interessa é a velocidade de corrosão e esta não é proporcional à tendência para a corrosão. Isto é compreensível se pensarmos que a tendência para a corrosão é medida em condições de equilíbrio (ausência de corrente; circuito aberto) enquanto que a velocidade de corrosão está ligada a um fluxo de corrente que para se verificar requer a ausência de equilíbrio. Ora pelos Princípios Gerais da Física sabemos que um sistema nestas condições reage de modo a contrariar a alteração que lhe deu origem.

Por exemplo quando flui corrente numa pilha galvânica, o potencial do ânodo faz-se sempre mais catódico e o do cátodo sempre mais anódico reduzindo-se deste modo o potencial entre os dois eléctrodos. Esta alteração é a real quer se esteja a retirar corrente ou pelo contrário a fornecer corrente à pilha. É o valor desta alteração do potencial, devido à passagem da corrente real aplicada ou extraída de um eléctrodo, que se chama polarização.

4.6.2 A pilha polarizada

De modo a compreendemos o fenómeno da polarização vejamos o que se passa com a pilha de Daniell esquematizada abaixo, na qual montamos um circuito exterior constituído pelos aparelhos de medida e pela resistência variável R.

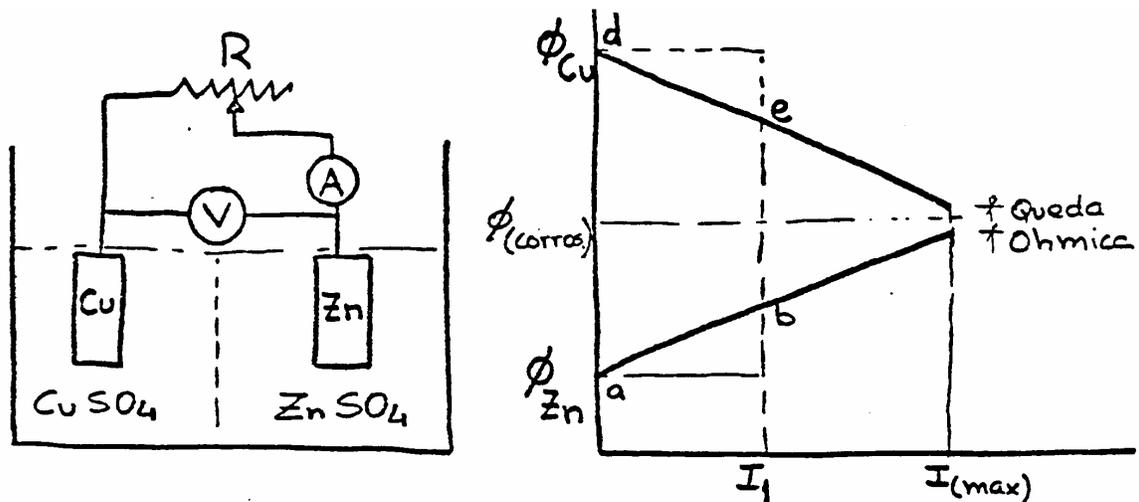


Figura 11

Na ausência de corrente o potencial dos eléctrodos é dado por ϕ_{Cu} e ϕ_{Zn} (potenciais de redução). À medida que a corrente no circuito exterior aumenta (por redução da resistência R) o cobre torna-se menos catódico e o zinco menos anódico apresentando para uma corrente I_1 os valores ϕ_e e ϕ_b . A polarização catódica é então dada por $(\phi_d - \phi_e)$ e a polarização anódica por $(\phi_b - \phi_a)$.

Quando a resistência R é retirada do circuito (eléctrodos em curto-circuito) a intensidade não atinge um valor infinito mas sim $I_{(max)}$ a que corresponde um potencial de corrosão dado por $\phi_{(corros.)}$. É este valor de $I_{(max)}$ que interessa nos fenómenos de corrosão pois é ele que segundo a lei de Faraday quantifica o fenómeno da corrosão, ou duma maneira ainda mais correcta, é o valor de $I_{(max)} / \text{área do ânodo}$ que nos dá a velocidade de corrosão uniforme de acordo com a definição dada anteriormente tendo em atenção a lei de Faraday.

Vejamos o que se passa se alterarmos as condições de polarização dos eléctrodos. Se reduzirmos a polarização dum dos eléctrodos ou de ambos, vamos reduzir as inclinações das curvas de polarização d-e ou a-b ou ambas, obtendo-se em todos os casos uma corrente de polarização $I_{(max)}$ maior. Pelo contrário se aumentarmos a polarização o valor de $I_{(max)}$ reduz-se obtendo-se portanto uma velocidade de corrosão menor.

Se nos debruçarmos sobre o diagrama dado anteriormente vemos que para determinar a velocidade de corrosão basta-nos conhecer $\phi_{(\text{corros.})}$ e o potencial e a curva de polarização dum dos eléctrodos pois isso permite calcular $I_{(\text{max})}$. Duma maneira geral é preciso conhecer ainda a relação das áreas dos eléctrodos pois as curvas de polarização são dependentes deste valor.

4.6.3 Causas da polarização

As causas da polarização dividem-se em três categorias diferentes:

4.6.3.1 *Polarização por concentração*

Para explicar este tipo de polarização consideremos o caso dum eléctrodo de cobre a funcionar como cátodo numa solução de CuSO_4 . Na ausência de corrente existe uma certa concentração de iões Cu^{++} junto ao eléctrodo; se estabelecermos o circuito, parte destes iões vão-se depositar no cátodo fazendo diminuir portanto a concentração de iões de Cu^{++} junto ao eléctrodo. A falta de iões junto ao cátodo faz com que o mesmo tenha tendência a dissolver-se de modo a atingir as condições de equilíbrio que tinha antes de se estabelecer o circuito; isto é o mesmo que dizer que o cátodo se tornou mais anódico, ou seja, que o cátodo se polarizou.

À medida que a corrente aumenta, a concentração de iões Cu^{++} junto ao cátodo vai baixando, aumentando-se deste modo a polarização. A densidade de corrente que dá origem a uma polarização infinita chama-se densidade de corrente limite. É lógico que esta polarização nunca possa ser alcançada na prática pois para valores elevados do potencial começam a dar-se outras reacções no eléctrodo como seja a libertação de hidrogénio:



4.6.3.2 *Polarização por activação*

Este tipo de polarização resulta de ser necessária uma energia de activação para se dar a reacção no eléctrodo. Um dos fenómenos mais característicos deste tipo de polarização é a sobre-tensão de hidrogénio. Para a explicarmos suponhamos a redução do ião de Hidrogénio no cátodo:



Ora esta reacção é feita em duas etapas, sendo a primeira rápida



e a segunda muito lenta



o que vai originar um aumento de hidrogénio absorvido no interior do eléctrodo, provocando deste modo, uma sobretensão que contraria a redução dos iões H^+ .

De modo análogo à sobretensão de hidrogénio no cátodo pode ser definida a sobretensão de oxigénio no ânodo.

Este tipo de polarização por activação é muito característico da deposição ou dissolução de iões metálicos, principalmente nos metais de transição.

A corrente i_0 para a qual se equilibram os fenómenos directos e inversos tem o nome de corrente de equilíbrio. Esta corrente de equilíbrio marca portanto o início da polarização, ou seja, o ponto a partir do qual a produção de hidrogénio (abs.) passa a ser maior que a produção de hidrogénio molecular.

4.6.3.3 *Queda Óhmica*

Esta polarização é devida à queda óhmica, na porção do electrólito que rodeia o eléctrodo ou na película superficial do produto da reacção do eléctrodo com o metal formado sobre a superfície ou devido a ambos os fenómenos.

4.6.3.4 *Nota*

Enquanto, que a polarização por concentração baixa com a agitação do electrólito, a polarização por activação e a queda óhmica não são afectadas de maneira significativa com este novo parâmetro.

4.6.4 Sobretensão de hidrogénio

O tipo de polarização que controla de modo significativo as velocidades de corrosão de muitos metais em água ou em ácidos não oxidantes é a sobretensão de hidrogénio nas áreas catódicas. Os valores da sobretensão de hidrogénio para um dado metal diminuem com:

- 1) aumento da temperatura visto que ela faz aumentar a solubilidade do hidrogénio no metal
- 2) rugosidade da superfície: uma superfície decapada por jacto de areia apresenta uma superfície maior e uma actividade catódica melhorada em relação à superfície polida
- 3) diminuição da densidade de corrente: visto que deste modo se reduz a velocidade de redução do H^+ na fase rápida do processo

A rapidez com que o $H_{(abs.)}$ se combina para formar H_2 (fase lenta) é afectada pelas propriedades catalíticas da superfície dos eléctrodos. Deste modo, se juntarmos um catalizador ao eléctrodo, a produção de hidrogénio gasoso é maior assim como a corrosão visto que diminui a polarização. Por outro lado, se juntarmos um veneno catalítico (SH_2 por exemplo) a sobretensão de hidrogénio aumenta diminuindo a corrosão; no entanto o aumento da sobretensão de hidrogénio provoca a entrada dos átomos de hidrogénio na rede do metal provocando a fragilidade ou a fissuração espontânea de algumas ligas de ferro (devido à criação de tensões internas elevadas).

4.6.5 Influência da polarização na velocidade de corrosão

Enquanto que nas pilhas galvânicas a quantidade de corrente produzida é limitada pela resistência do electrólito e pela polarização dos eléctrodos, nas pilhas de acção local o que interessa é a polarização dos eléctrodos já que eles estão em curto-circuito.

Existem vários tipos de controlo da corrosão:

4.6.5.1 Controlo anódico

Neste tipo de controlo, a polarização dá-se preferencialmente no ânodo. Neste caso o potencial de corrosão é próximo do potencial do cátodo como poderemos ver no diagrama.

4.6.5.2 Controlo catódico

Neste caso a polarização concentra-se no cátodo pelo que o potencial de corrosão é próximo do potencial anódico.

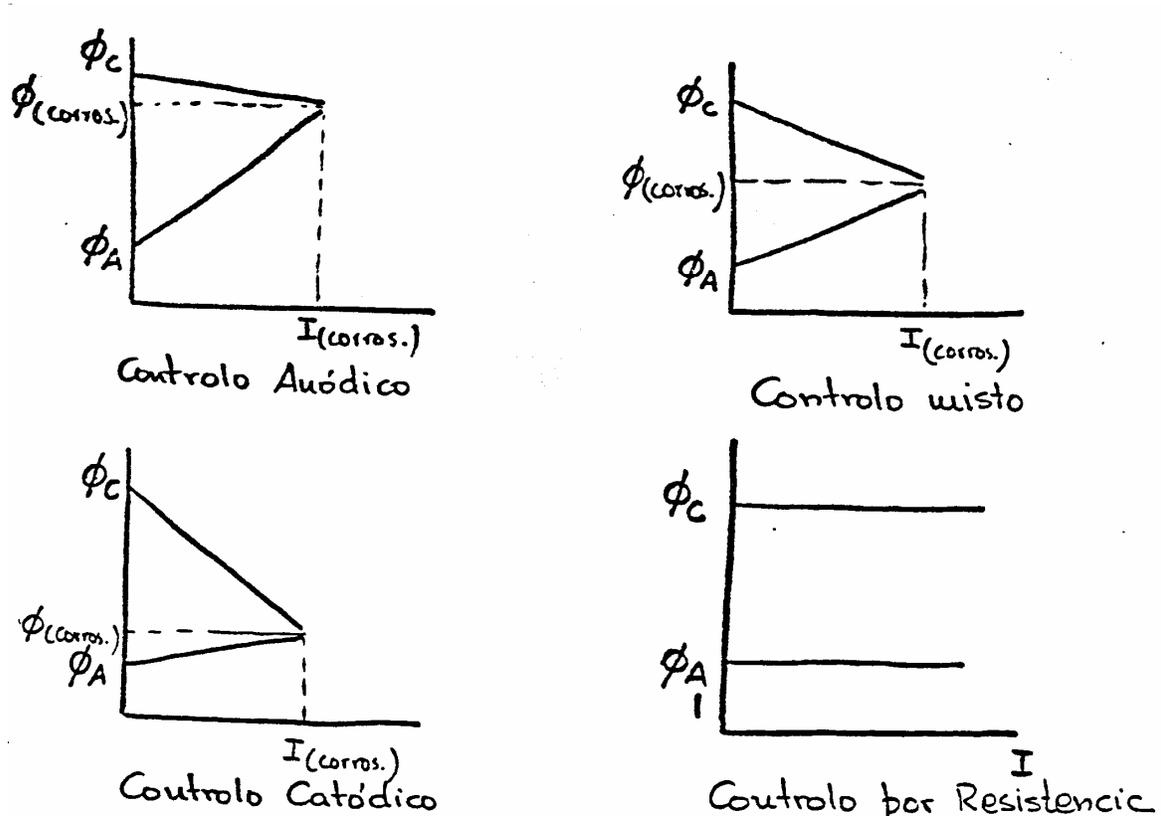


Figura 12

4.6.5.3 Controlo por resistência

Neste caso a resistência do electrólito é tão elevada que a corrente gerada é insuficiente para polarizar qualquer dos eléctrodos.

4.6.5.4 Controlo misto

Neste caso a polarização dos dois eléctrodos é da mesma ordem de grandeza.

4.6.5.5 Importância da superfície dos eléctrodos

Quando ligamos um circuito exterior a uma pilha galvânica, a corrente que o percorre é a mesma em todos os pontos do circuito fechado. Ora, como vimos fenómenos de polarização são dependentes não desta corrente total mas sim da densidade de corrente, que não sendo a mesma em ambos os eléctrodos (devido a superfícies diferentes dos eléctrodos) vai provocar fenómenos de polarização de intensidade diferentes, dando origem a um potencial de corrosão diferente.

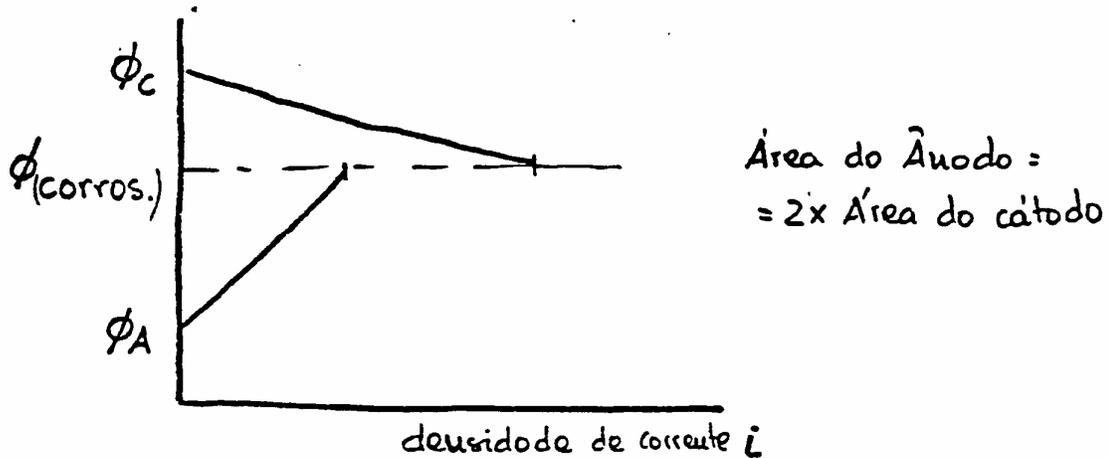


Figura 13

Este fenómeno explica a razão pela qual interessa conhecer o valor das áreas do ânodo e do cátodo para se determinar a velocidade de corrosão.

4.7 Teoria da Protecção catódica

A protecção catódica baseia-se no facto de que se polarizarmos o cátodo de uma pilha a um ponto tal que o seu potencial fique com o mesmo potencial do ânodo, não poderá haver corrosão visto que os dois eléctrodos estão ao mesmo potencial. Para conseguirmos isto, fornecemos uma corrente externa ao metal que se corrói, no qual existem pilhas de acção local como vemos no esquema.

A corrente sai do ânodo auxiliar entrando tanto pelas áreas catódicas como pelas anódicas. A intensidade de corrente que se tem que aplicar é dada no diagrama por $I_{aplicada}$. Se a corrente fornecida for menor que esse valor a protecção não é completa. Se a corrente for maior, continua a não haver corrosão (visto a corrente real entrar pelas áreas anódicas não permitindo deste modo a dissolução do ânodo) mas esta sobre intensidade pode danificar os revestimentos, pelo que não é de aconselhar.

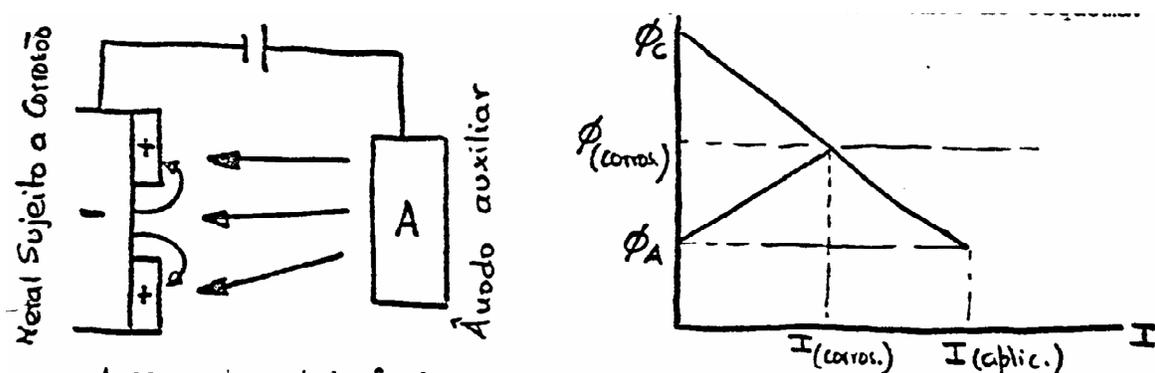


Figura 14

4.8 PASSIVAÇÃO

4.8.1 Definição

Um metal passivado é aquele que sendo activo na série electroquímica apresenta uma velocidade de corrosão muito pequena.

Existem dois processos de definir a passividade:

- um metal activo na série electroquímica ou uma liga composta por metais activos considera-se passivado quando o seu comportamento electroquímico é de um metal menos activo ou mais nobre.
- um metal ou uma liga diz-se passivado se resiste à corrosão num meio onde a sua passagem do estado metálico aos produtos de corrosão seria acompanhada duma diminuição da energia livre.

Estes dois meios de definir a passivação têm amplitudes diferentes pois enquanto que no primeiro não se faz nenhuma referência ao meio corrosivo (portanto para um metal estar passivado tem que resistir à corrosão em todos os meios) no segundo a passivação é definida em relação a determinado meio.

Sob o ponto de vista prático a segunda definição tem mais interesse pois em geral os problemas de corrosão aparecem para um determinado metal em contacto com um determinado electrólito.

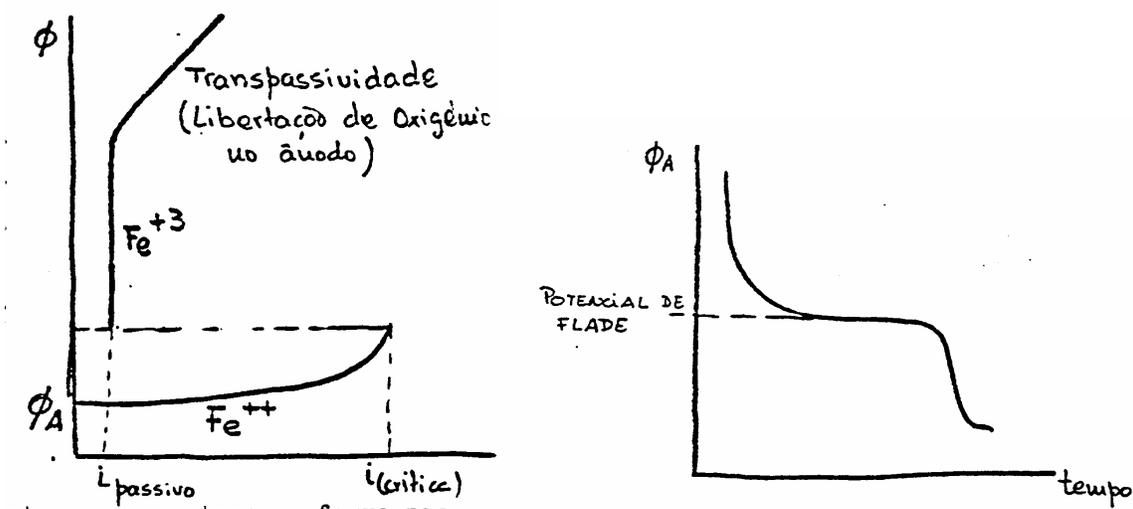
4.8.2 Características da passivação

Suponhamos que temos um ânodo de ferro numa solução de H_2SO_4 . Vamos traçar a curva que nos dá a corrente de polarização para cada valor do potencial de corrosão. Isto pode ser conseguido à custa dum aparelho chamado potencio-estacto que tem a propriedade de determinar a corrente de polarização para cada valor do potencial.

Vejamos o que se passa. Para densidades de corrente pequenas o ferro corrói-se como Fe^{++} de acordo com a lei de Faraday. À medida que aumenta a corrente forma-se uma película superficial, isolante (provavelmente de H_2SO_4). Para uma densidade de corrente $i_{critica}$ dá-se uma descontinuidade no valor da corrente que passa para o valor i passivo muito mais baixo, a que corresponde uma velocidade de corrosão ínfima; para este valor da densidade de corrente a protecção superficial destrói-se

estabelecendo-se uma outra de espessura muito mais reduzida. Dizemos neste caso que temos o ferro passivado sendo o produto da corrosão Fe^{+3} . Quando se atinge o potencial de equilíbrio do eléctrodo de oxigénio começa a haver tendência para a libertação de oxigénio no ânodo o que vai aumentar a corrente e deste modo a corrosão; a este fenómeno chama-se transpassivação.

Se neste ponto interrompermos a corrente anódica o ferro irá perder a passividade de acordo com o gráfico seguinte. O potencial a que se dá a perda da passividade chama-se potencial de Flade; este potencial é dependente fundamentalmente da acidez do electrólito e determina a estabilidade da película passiva. Para o caso do ferro a película não é estável desaparecendo ao fim de poucos segundos após a interrupção da corrente anódica.



4.8.3 Comportamento dos passivadores

A reacção química esquemática que se realiza na passivação anódica é suposta ser a seguinte:



em que O.M se refere ao oxigénio sobre o metal M na película passiva, qualquer que seja a composição e estrutura da película passiva. Podemos inferir daqui que aos fenómenos de passivação está sempre associada uma oxidação; o agente principal deste fenómeno é o electrólito que toma o nome de passivador. Podemos definir passivador como o agente oxidante inorgânico que tem a propriedade característica de reagir lentamente quando está em contacto com o metal mas que se reduz rapidamente por influência das correntes catódicas.

Vejamos como actua um passivador. Quando mergulhamos um metal num passivador formam-se pilhas de acção local; o passivador reduz-se nas áreas catódicas com uma densidade de corrente equivalente à densidade de corrente verdadeira nas áreas anódicas, igualando ou excedendo $i_{critica}$. A extensão da área catódica é superior à necessária para formar uma película passiva equivalente nas áreas anódicas residuais. Obtidos alguns pontos passivos, portanto muito mais nobres, eles passam a funcionar

como cátodos indo absorver o passivador das regiões vizinhas o que faz aumentar a zona passivada. Quando toda a superfície do metal está passivada, comporta-se como cátodo em toda a sua extensão e a redução subsequente do passivador continua mas agora com uma velocidade muito mais baixa, equivalente à velocidade de ruptura da película passiva contínua.

4.8.4 Protecção anódica. Transpassividade.

A natureza electroquímica do processo de passivação explica a razão pela qual a polarização anódica utilizando corrente, aplicada ou aumentando a área catódica ou a velocidade de reacção catódica (que aumenta a polarização das restantes áreas anódicas) favorece a formação e duração da passividade.

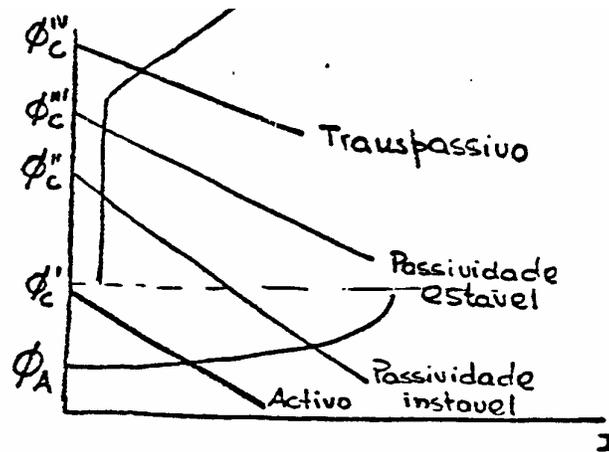


Figura 15

O gráfico que se apresenta a seguir mostra as características de polarização de um metal que é activo ou passivo consoante a sobretensão das áreas anódicas. Foi este fenómeno que esteve por detrás das duas definições de passivação. As características intrínsecas dos materiais que possibilitam conferir as propriedades de passivação são a sua composição química e as estruturas presentes.

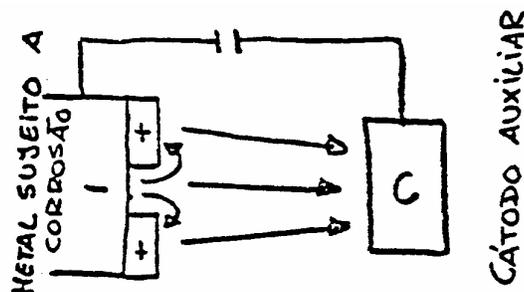


Figura 16

A passivação pode ainda conseguir-se aplicando uma corrente externa, caso em que se executa a chamada protecção anódica. A diferença entre esta protecção e a protecção catódica diz respeito ao sentido da corrente de polarização.

Enquanto que a protecção catódica pode ser aplicada em metais activos ou passivos, a protecção anódica só pode ser empregue no caso de metais que se possam passivar quando se polarizam anodicamente.

4.9 Decapagem Electrolítica

4.9.1 Aplicação do processo

A decapagem electrolítica é utilizada principalmente nos aços ao carbono e nos aços de liga. Este processo tem as seguintes vantagens em relação à decapagem química:

- 1) como em geral a película de óxido que se quer retirar não apresenta uma espessura uniforme, a decapagem química vai atacar o material virgem em alguns pontos da peça.
- 2) O hidrogénio produzido durante um ataque químico penetra no material
- 3) a concentração do ácido numa decapagem química diminui rapidamente durante o processo e a actividade da solução decapante decai.

No caso da decapagem electrolítica aparecem todos estes fenómenos mas com intensidade muito mais reduzida. Por outro lado uma oficina de tratamentos electrolíticos fica mais cara que uma de tratamentos químicos, principalmente devido à aparelhagem eléctrica; é esta a razão que explica em muitos casos a não aplicação de processos electrolíticos.

Na decapagem electrolítica podem ser empregues dois processos de trabalho que eliminam a película de óxido por mecanismos completamente diferentes. Em ambos os processos de trabalho tira-se partido da dissolução anódica dos metais e da redução catódica do hidrogénio. A análise qualitativa pode ser feita com base nas curvas de polarização do cátodo e do ânodo que se explicaram no capítulo da corrosão.

4.9.2 Fundamento dos processos

4.9.2.1 Decapagem catódica

Neste caso a peça que se pretende decapar funciona como cátodo. Como ânodo emprega-se o chumbo laminado, lâminas de níquel, de ferro ou de silício.

Para se perceber o modo como se consegue decapar por este processo vejamos o gráfico seguinte:

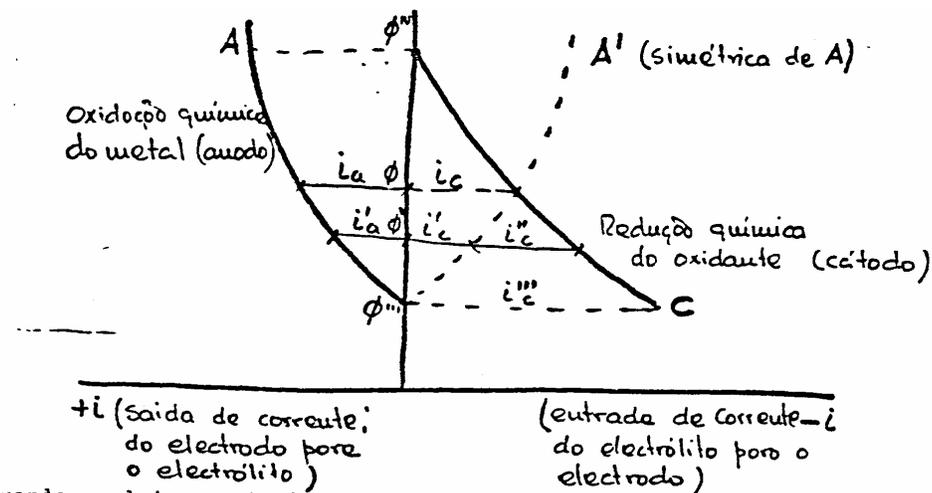


Figura 17

Quando os dois eléctrodos formam uma pilha galvânica através dum circuito exterior, vai-se estabelecer uma corrente que polarizando os eléctrodos iguala a corrente em todo o circuito, igualando deste modo a quantidade de metal dissolvido e a quantidade de oxidante reduzido ($i_a = i_c$). Quando se fornece corrente a esta pilha de modo a reduzir o potencial de corrosão, a velocidade de oxidação do metal diminui de acordo com a curva A (i'_a) enquanto que a velocidade correspondente de redução do oxidante diminui de acordo com a curva A' (i'_c); no entanto vemos pelo gráfico que para o potencial ϕ' a corrente total de redução do oxidante é dada por um valor da curva C ($i'_c + i_c''$). É o excesso de corrente i_c'' que determina a velocidade de redução como resultado da polarização catódica do eléctrodo devida a uma corrente exterior. Quando se atinge o potencial ϕ''' a dissolução do metal é mínima sendo máxima a polarização no cátodo; esta polarização máxima está associada a uma redução máxima dos óxidos e a uma libertação elevada de hidrogénio que é responsável pela remoção da camada de óxido.

4.9.2.2 Decapagem anódica

Neste caso a peça funciona como ânodo. Como cátodo emprega-se o ferro ou chumbo laminado. Para a decapagem anódica a corrente aplicada vai deslocar o potencial de redução para o valor ϕ''' ; para este valor do potencial a polarização do cátodo é mínima (não se dá portanto origem à produção de hidrogénio) sendo máxima a dissolução espontânea e dissolução anódica. No ânodo são ainda libertadas algumas bolhas de oxigénio; o mecanismo de eliminação da película de óxido é então um misto de dissolução e desagregação pela libertação gasosa.

4.9.3 Fenómenos característicos a evitar nos processos de decapagem

4.9.3.1 Decapagem catódica

Neste tipo de decapagem como a peça funciona como cátodo não está sujeita a variações dimensionais provenientes de dissolução de material virgem. Existe no entanto outro fenómeno importante na decapagem catódica; com efeito, como vimos neste tipo de decapagem há produção de hidrogénio no cátodo (peça que estarmos a tratar). Para evitar que o hidrogénio produzido seja absorvido pelas zonas já

decapadas (que iria provocar no caso dos aços uma perda de ductilidade) é normal juntar ao electrólito sais de chumbo e estanho. A função destes sais é formar uma fina película de chumbo ou estanho nas zonas já decapadas, enquanto que a produção de hidrogénio nas zonas ainda não decapadas ajuda a remoção da camada de óxido. Após se ter efectuado a decapagem é preciso retirar esta película o que pode ser conseguido por meio dum tratamento anódico numa solução alcalina.

4.9.3.2 *Decapagem anódica*

Em todos os processos electrolíticos o ânodo é o eléctrodo que se consome. No caso da decapagem anódica estamos portanto na posição mais favorável de eliminação da película de óxido. No entanto se não empregarmos uma técnica apurada pode suceder que após a eliminação da camada de óxido se dê a corrosão do metal virgem; para que isto não suceda é preciso empregar densidades de corrente e electrólitos de composição estudada de modo a fazer-se a passivação das zonas já decapadas.

4.9.4 Efeito da decapagem electrolítica nas propriedades dos metais

A variação das propriedades mecânicas dos metais produzida pela decapagem, são resultantes da difusão no metal do hidrogénio produzido durante o processo. Como vimos no capítulo da corrosão electrolítica a sobretensão de hidrogénio é dependente da composição e da estrutura do metal; uma percentagem elevada de carbono e a presença de numerosos elementos de liga reduzem o coeficiente de saturação de hidrogénio no aço. Do mesmo modo a presença no electrólito de certos elementos, como sejam o arsénio, antimónio, fósforo, bismuto e selénio, facilitam a penetração do hidrogénio enquanto que o chumbo e o estanho actuam em sentido contrário.

A alteração das propriedades mecânicas pela decapagem catódica torna necessário uma escolha aturada dos valores dos parâmetros que condicionam este processo tecnológico.

Após a operação de decapagem torna-se necessário aquecer as peças durante duas ou três horas, a uma temperatura da ordem dos 180-200°C de modo a eliminar o hidrogénio. Não é além disso recomendável submeter a uma decapagem catódica peças que vão estar sujeitas a esforços alternativos pois eles facilmente romperiam por corrosão por fadiga.

4.10 Anodização

4.10.1 Definição

É sabido que o alumínio se apresenta coberto por uma fina camada de óxido de espessura de 40-50 Å. É esta camada porosa e de baixa resistência mecânica que evita a corrosão do metal.

Quando se pretende eliminar completamente a corrosão por meio dum revestimento convencional (electro-deposição, pintura, envernizamento) depara-se com uma série de dificuldades provenientes da falta de aderência do revestimento o que torna dispendioso o processo completo para obtenção de revestimentos e boas condições.

Devido a esta particularidade pensou-se em conseguir a resistência corrosão do alumínio por meio do aumento da espessura da camada de óxido que usualmente cobre a sua superfície. Os processos de que dispomos para atingir este objectivo são:

Aquecimento do alumínio em atmosfera de ar ou oxigénio. Tem o inconveniente de dar origem a uma camada de óxido fina e frágil.

- Ataque com um agente oxidante. A película formada por este processo não apresenta grande resistência à corrosão. No entanto este tratamento dá origem a uma boa superfície para pintura ou envernizamento.

Anodização. Por este processo poder-se obter camadas de óxido que atingem os 0,8 mm com boas características de dureza, elasticidade e porosidade.

Os electrólitos para tratamento de metais podem ser divididos em três categorias deferentes:

- 1) electrólitos que não dão origem, a nenhuma película ou formam uma película muito fina e porosa
- 2) electrólitos que formam uma película fina mas não porosa (espessura de 1 a 10 micras) que possui uma resistência grande à ruptura e dissolução (efeito de válvula)
- 3) electrólitos que permitem obter uma película grossa com boa resistência à corrosão.

Nos trabalhos de anodização são estes últimos electrólitos que têm aplicação. Para, se executar uma anodização faz-se trabalhar a peça que queremos anodizar como ânodo, sendo a oxidação provocada pelo oxigénio -libertado no processo electrolítico.

Durante um processo de anodização estão envolvidos os seguintes fenómenos:

- 1) libertação de hidrogénio no cátodo
- 2) formação de uma película dura de óxido no ânodo
- 3) dissolução do metal do ânodo no electrólito
- 4) libertação de oxigénio no ânodo

4.10.2 Mecanismo de oxidação anódica

O mecanismo de oxidação anódica do alumínio é explicado da seguinte maneira:

Numa primeira fase forma-se uma película fina mas não porosa na superfície do metal. Esta película pode ser assemelhada a uma barreira em que os iões de alumínio e oxigénio ocupam os extremos da rede cristalina. Quando se aplica um potencial anódico, os iões de oxigénio dirigem-se para o material virgem indo oxidá-lo e os iões metálicos dirigem-se para a interfase óxido-electrólito sendo oxidados pelo oxigénio libertado no ânodo.

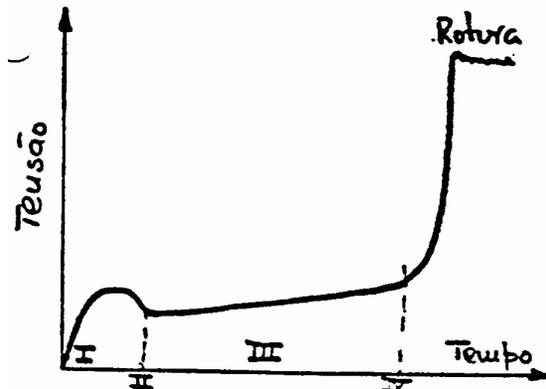
Numa segunda fase dá-se uma hidratação da película de óxido que se torna porosa, permitindo assim que a corrente a atravesse e vá oxidar nova espessura de material.

Neste mecanismo existem portanto duas películas de óxido de estrutura muito diferente. A oxidação é conseguida pelo deslocamento, para o interior do metal, da

película fina e não porosa que funciona como tampão (queda de tensão 60 V.) e pela transformação desta película porosa numa queda de tensão proporcional à espessura da zona porosa.

4.10.3 Crescimento da camada de óxido

Vejam os gráficos que nos dá a variação da tensão no banho (electrólito) em função do tempo de anodização do alumínio.



O significado das regiões do gráfico é a seguinte:

I - Uma redução da velocidade de crescimento da tensão durante os poucos segundos iniciais, que nos indica a formação da película fina pouco porosa e de grande resistividade.

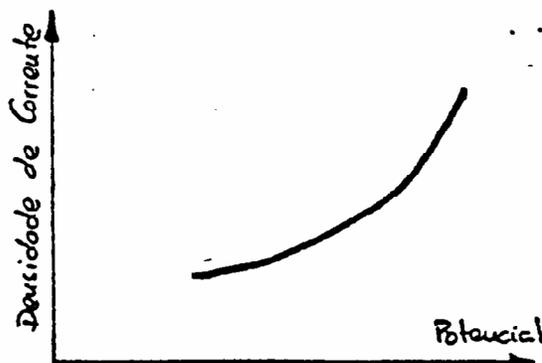
II - Uma redução da ordem dos 10-15% da voltagem máxima, que nos indica a formação de poros na camada de óxido.

III - Um crescimento gradual da resistência eléctrica devido ao aumento da espessura da camada de óxido e da profundidade dos poros. O aumento absoluto da tensão não é grande durante um tempo apreciável.

IV - Um aumento repentino da curva da tensão, que indica a ruptura da camada de óxido, o que ocorre unicamente no caso de camadas de óxido de grande espessura (nos trabalhos de anodização nunca se atinge esta zona).

4.11 **Revestimentos Electrolíticos**

O processo de revestimentos electrolíticos consiste em formar metal sólido sobre a superfície dum cátodo, partindo dos iões do metal existentes numa solução, mantendo-se a concentração desses iões graças à dissolução de um ânodo. O metal de revestimento existe na solução (electrólito) como catião ou ião positivo e quando este tipo de iões alcança o cátodo é neutralizado por um ou mais electrões; o átomo metálico formado ocupa um determinado lugar na estrutura cristalina já existente ou intervém na formação dum novo cristal. A diferença de potencial, que existe entre o cátodo e ânodo é chamada potencial de deposição. É maior para a nucleação do que para o crescimento de um cristal e depende, da densidade de corrente segundo se mostra na figura seguinte.



A quantidade de metal depositado está relacionada com a intensidade de corrente que se estabelece entre o cátodo e o ânodo sendo expressa pela lei de Faraday quando a deposição se efectua nas condições ideais. Na maior parte dos casos, parte da corrente é consumida na formação e libertação de hidrogénio junto ao cátodo e a

quantidade de metal depositada é menor que a deduzida pela lei de Faraday.

Existem dois parâmetros fundamentais nos processos de revestimentos electrolíticos. Um é o chamado poder de penetração, que determina a uniformidade do depósito que se forma tendo em conta as diferentes distancias ao ânodo para as diferentes partes do cátodo e a inclinação dessas superfícies. Experimentalmente chegou-se à conclusão que a composição das soluções empregues nos revestimentos electrolíticos influem no poder de penetração. A outra variável é a uniformidade ou "planura" dos depósitos, que determina o acabamento brilhante ou baço da superfície do revestimento (este tipo de irregularidade tem dimensões muito reduzidas). Empiricamente chegou-se à conclusão de que a adição de colóides orgânicos ao electrólito provoca revestimentos mais brilhantes. Em casos extremos, os depósitos rugosos apresentam características dendríticas.

Se um electrólito para revestimento contiver dois metais diferentes pode-se, por vezes, depositar ambos simultaneamente, obtendo-se sobre o cátodo um revestimento com as características de uma liga. Parece que, nestes casos, é normal que se formam directamente soluções sólidas, se bem que existam provas da formação directa de fases intermédias.

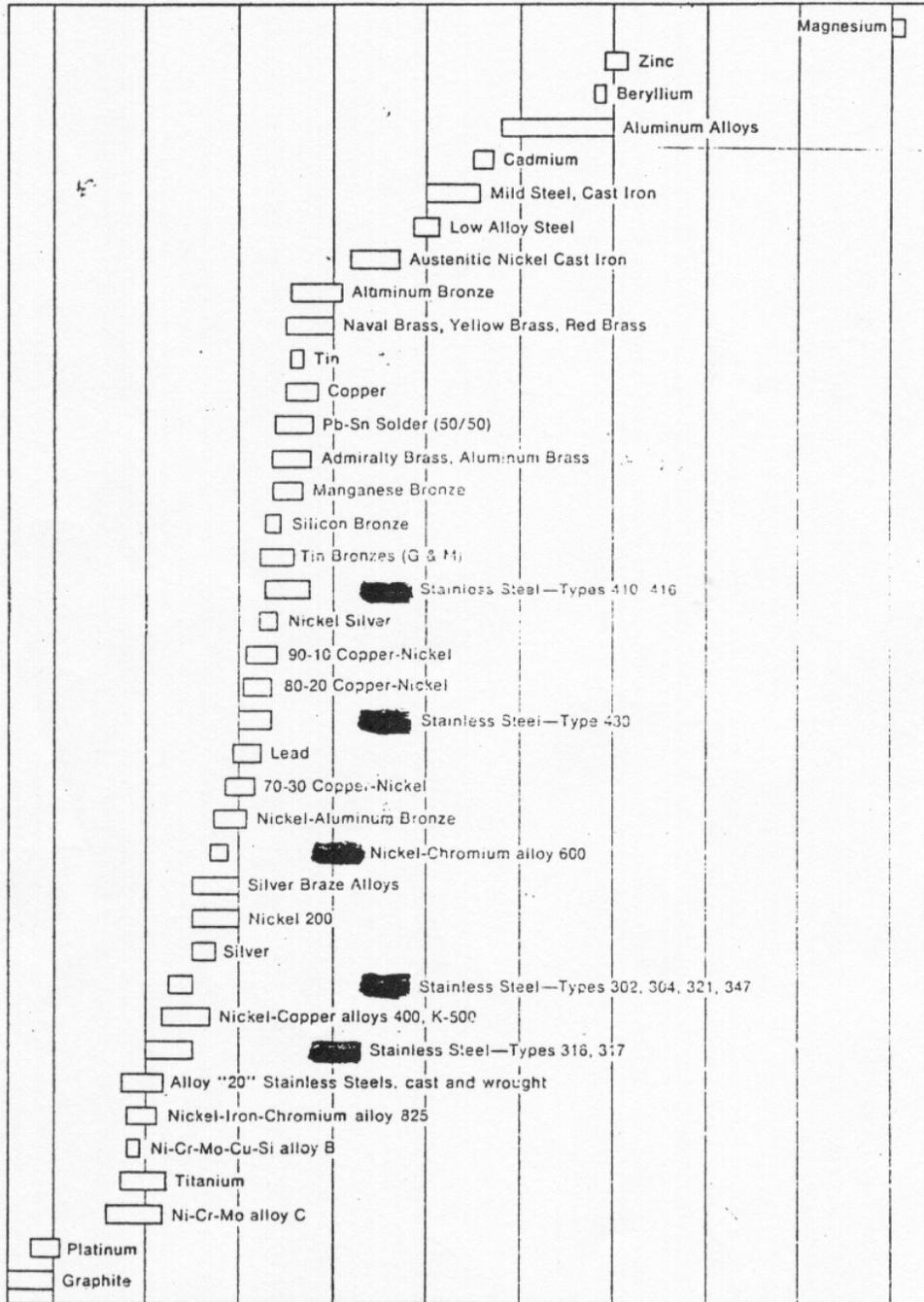
No caso da cromagem dura ou decorativa, os iões metálicos são formados no electrólito não havendo dissolução do ânodo; deste modo os electrólitos para estes revestimentos envelhecem com o tempo exigindo um controlo constante da sua composição.

Figure 10

CORROSION POTENTIALS IN FLOWING SEAWATER
(8 TO 13 FT./SEC.) TEMP RANGE 50° - 80°F

VOLTS: SATURATED CALOMEL HALF-CELL REFERENCE ELECTRODE

+0.2 0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 -1.0 -1.2 -1.4 -1.6



Alloys are listed in the order of the potential they exhibit in flowing seawater. Certain alloys indicated by the symbol: [shaded box] in low-velocity or poorly aerated water, and at shielded areas, may become active and exhibit a potential near -0.5 volts.

4.12 Passividade Electroquímica dos Metais

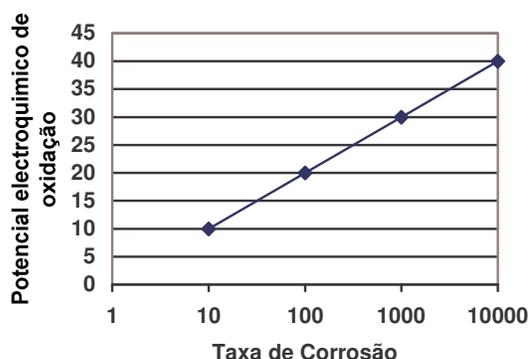
(de *Corrosion Engineering* – Fontana & Green pág. 17)

O fenómeno de passividade metálica tem fascinado cientistas e engenheiros há mais de 120 anos, desde os dias de Faraday.

Embora seja difícil de definir, por causa da sua natureza complexa e das condições específicas debaixo das quais ocorre, na sua essência, a passividade corresponde à perda de actividade química experimentada por certos metais e ligas, debaixo de condições ambientais particulares, isto que dizer que certos metais ou ligas, em determinadas condições, tornam-se essencialmente inertes e actuam como se fossem nobres, com um comportamento idêntico à platina ou ao ouro.

Felizmente, alguns dos metais mais comuns em engenharia são susceptíveis deste comportamento. Figuram entre este grupo o ferro, o níquel, o silício, o crómio, titânio e ligas destes metais pelo que esta propriedade é largamente utilizada. Sob condições limitadas, outros metais como o zinco, o cádmio, o estanho o urânio e o tório, também podem apresentar efeitos de passividade.

Apesar da dificuldade na sua definição a passividade pode ser descrita qualitativamente, caracterizando o comportamento anormal desses metais.

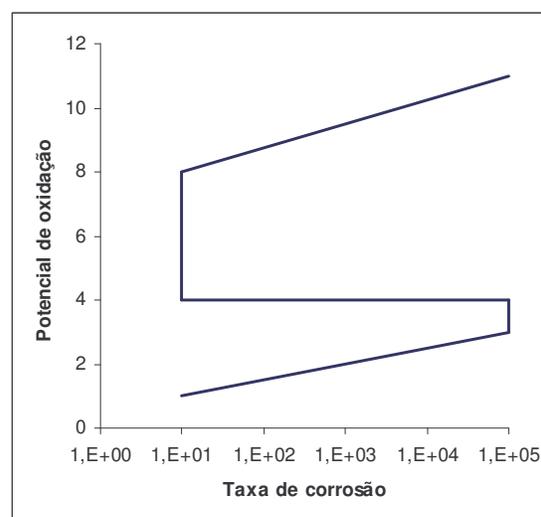


Considere-se primeiro o comportamento do que se estabelece como um metal “normal” (sem apresentar características de passividade) na figura seguinte:

Nesta figura está representado um metal imerso num ácido em solução desaerificada, com poder oxidante e a consequente taxa de corrosão, segundo a linha traçada.

Aumentando o poder oxidante desta solução, adicionando oxigénio ou iões ferrosos, a taxa de corrosão do metal aumentará rapidamente de uma forma exponencial (notar que o sistema de representação é semi-logarítmico) – o poder oxidante da solução é controlado tanto pelo poder oxidante específico dos reagentes, como pela concentração desses reagentes.

A figura seguinte mostra o comportamento tipo dum metal passivo. O comportamento deste metal ou liga pode ser convenientemente dividido em 3 zonas – activa, passiva e transpassiva. Na região activa o material comporta-se como um metal normal. A partir de um determinado poder oxidante da solução, há um rápido aumento na taxa de corrosão. Adicionando mais oxidante, a taxa de corrosão mostra uma redução rápida o que corresponde ao



início da região passiva. Acumulando mais os agentes oxidantes, não se produz o correspondente aumento da região de corrosão. Finalmente, para concentrações de oxidantes muito altas, ou com oxidantes poderosos, a razão da corrosão volta a aumentar na região transpassiva).

De notar que existe uma redução de 10^3 a 10^6 da taxa de corrosão na transição da região activa para a região passiva. A causa precisa destas modificações de comportamento não são conhecidas; poderemos apresentar como hipótese o estabelecimento de uma situação de polarização activa devido à formação de um filme ou barreira de protecção superficial que é estável numa considerável gama de potencial oxidante e que se destroi em situações extremamente oxidantes.

Este mecanismo de passivação é aproveitado em situações concretas na indústria. Um caso bastante típico é o dos aços oxidáveis, cujos potenciais electroquímicos e condições oxidantes que permitem a passivação, ocorrem nas condições normais, quer no ar ambiente, quer em água doce ou salgada normalmente oxigenada (por aerificação).

5 Revestimentos Metálicos

O uso de revestimentos metálicos como processo de reduzir ou eliminar a corrosão de peças metálicas é bastante popular em diversas aplicações, quer em aplicações industriais, quer em aplicações de consumo.

Os processos tecnológicos de aplicação de revestimentos metálicos mais usuais são os seguintes:

- 1) imersão em banho de material em fusão
- 2) deposição electrolítica
- 3) revestimentos por projecção à pistola (metalização)
- 4) reacção em fase gasosa.

A adopção de um ou de outro processo tem a ver com a aplicações, com o custo e com o grau de protecção pretendido.

Em todos os casos tem de haver uma limpeza perfeita da superfície que é o suporte da aplicação, não só removendo sujidade e gordura como também humidade e compostos resultantes de oxidantes ou outros.

A aplicação industrial dos revestimentos apresenta sempre um determinado grau de porosidade; este aspecto (existência de poros) e os danos mecânicos dos revestimentos são muito importantes.

Nesse sentido é costume dividir-se os revestimentos metálicos em duas categorias:

Revestimentos nobres – o material do revestimento é mais nobre que o metal base da série galvânica; o revestimento funciona de cátodo e o metal base de ânodo e neste caso existe o perigo de, na presença do electrólito aparecer uma pilha galvânica que destruirá o metal base; se não forem tomadas medidas para o evitar.

Revestimentos de sacrifício – neste caso o metal do revestimento é mais activo na série galvânica que o metal base. Eventuais danos no revestimento ainda que indesejáveis não provocam danos de monta, imediatos no metal base.

Os revestimentos metálicos mais vulgares são:

Zincagem do aço – revestimento de sacrifício normalmente feito por imersão em banho de material em fusão. Usa-se extensivamente em navios.

Cadmiagem do aço – revestimento de sacrifício mais estável que a zincagem porque a diferença de potencial entre o Cd e o Fe é menor que entre o Zn e o Fe. Normalmente é feito por electrólise. Usa-se no revestimento de rebites, nas ligações bimetálicas entre alumínio e aço.

Uso do alumínio - normalmente revestimento nobre.

Cromagem do ferro - bastante comum; não só nas funções de protecção anticorrosiva como também em zonas de desgaste mecânico. Normalmente é feito por electrodeposição e sendo um revestimento poroso, é antecedido por um revestimento de níquel. O uso de cromagem para efeito de protecção contra o desgaste designa-se por cromagem dura.

Estanhagem - aplicação através de banho de fusão e de electrodeposição. Uma das aplicações mais conhecidas é o revestimento da folha de Flandres.

Niquelagem - electrodeposição; usa-se principalmente como camada de permeio na cromagem.

5.1 Anodização

Anodização é um tratamento superficial destinado a produzir uma camada protectora e decorativa em componentes de alumínio e nas suas ligas.

Trata-se de um processo de produzir uma camada de óxido de alumínio (alumina) na superfície de uma peça de alumínio, quando uma corrente contínua de suficiente voltagem passa através de um electrólito em que a peça de alumínio está mergulhada e actua como ânodo e em que o cátodo é feito de um material adequado.

O electrólito mais corrente é o ácido sulfúrico diluído em água, havendo casos em que é exigido um solução de ácido crómico ou outros, necessários para aplicações específicas.

Embora ainda não esteja completamente estabelecido, julga-se que o mecanismo de anodização é como se segue:

Quando se aplica uma corrente eléctrica contínua ao alumínio numa solução de ácido sulfúrico (com 10-15% por volume) à temperatura ambiente, com as ligações feitas de forma que o alumínio seja o ânodo (ligado ao + da fonte de energia) e outro material (por exemplo o chumbo) seja o cátodo, ocorre uma decomposição H_2SO_4 , com libertação de H_2 junto ao cátodo através de uma reacção de redução $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$; no ânodo ocorre uma oxidação com dissolução do alumínio que reage e se combina parte com o ião oxigénio, parte com o ião sulfato. A formação do oxido de alumínio tem lugar na superfície da peça. Para que o fluxo da corrente seja adequado (1.0 a 1.5 Amp/dm²), é necessário um potencial da ordem dos 13 – 17 volts.

Como se calcula, a espessura do filme superficial de óxido é proporcional ao tempo de exposição, pelo menos numa primeira fase. A partir de determinadas espessuras do filme, o seu aumento passa a ser mais lento e atinge-se um valor limite de espessura, função de composição da liga.

Existem ligas particularmente adequadas para anodização e em termos económicos a camada de anodização regula entre os 10 – 15 μm na maioria das aplicações correntes, a 25 μm para casos onde se exige uma camada mais espessa para possibilitar uma maior resistência à corrosão.

Uma vez que a camada de óxido é porosa, existe uma operação seguinte, designada por colmatagem que consiste na introdução da peça em água em ebulição, promovendo a hidratação do revestimento de oxido, e portanto tornando-o muito mais estável e resistente ao ataque de agentes corrosivos.

Esta operação de colmatagem pode ser precedida da coloração da peça, para efeitos estéticos ou outros.

O alumínio anodizado que têm uma aplicação generalizada em construção civil, tem também muitas aplicações em engenharia naval, sendo neste caso importante garantir

uma espessura de anodização superior a 15 μm , preferivelmente de 20 μm ou superior e garantir que a colmatagem foi devidamente executada.

6 REVESTIMENTO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS POR PINTURA

6.1 Preparação da Superfície

A aplicação de um qualquer esquema de pintura exige a ausência de matérias estranhas de qualquer natureza na superfície metálica.

Deve ser efectuada uma lavagem com desengorduramento para remover sais, gorduras, ácidos, matéria sólida, etc.

Deve fazer-se em seguida uma decapagem para remoção dos óxidos estranhos à superfície metálica.

A decapagem pode ser:

- química
- com ferramentas mecânicas
- com jacto abrasivo
- com jacto de água com alta pressão

No que se refere a superfícies de aço o processo mais eficaz é a decapagem com jacto abrasivo, extensivamente usado em estaleiros, sobretudo em construção e na decapagem de carenas durante as acções de conservação periódicas.

6.2 Aplicação do esquema de Pintura

Especificado o esquema de pintura, que deve ser adequado à protecção da superfície metálica, face ao ambiente, acções mecânicas e outras acções exteriores, a aplicação das tintas deve ter em consideração o seguinte:

- As condições ambientais devem ser adequadas – temperatura e humidade; os fabricantes recomendam os valores mínimos aceitáveis para tempo e humidade – de uma forma geral, deve-se pintar em situações que a temperatura esteja 4 a 5° C acima do ponto de orvalho, isto é: deve-se ter a certeza que não existe condensação de humidade na superfície metálica. Convém notar que temperaturas muito elevadas também são negativas pois a secagem é rápida demais.
- As tintas devem ter boa qualidade, estar homogeneizadas e adequadamente diluídas.

As ferramentas de aplicação (rolo, trincha, pistola de pulverização) devem ser adequadas, designadamente os bicos de pulverização e a pressurização dos respectivos circuitos.

Devem ser respeitados as espessuras do filme de tinta, indicados pelo fabricante e devem ser respeitados os tempos de secagem e intervalos entre demãos.

Algumas tintas têm de ser preparadas na altura de aplicação porque são produzidas pela mistura de 2 componentes que se misturam na altura; estas tintas têm um prazo de utilização muito curto normalmente 8 horas (pot life), não podendo ficar de um dia para o outro.

No que se refere à aplicação de tintas deve ainda tomar-se em consideração os seguintes aspectos:

- Na aplicação sobretudo em espaços fechados deve ser garantido que existem as adequadas condições de ventilação para segurança do pintor e não devem ser criadas condições para a ocorrência de incêndio ou explosão, pois em geral a atmosfera é potencialmente explosiva.
- Não se devem misturar tintas de fabricantes / tipos diferentes pois a compatibilidade entre camadas é essencial para o bom êxito de uma protecção por pintura, igualmente devem apenas ser usados os diluentes e solventes recomendados pelo fabricante ou previamente ensaiados em laboratório.
- O cálculo da quantidade da tinta necessária tem em consideração o respectivo rendimento, medida em m²/litro, relacionado com a espessura. Existe um rendimento teórico e um rendimento prático; este último tem em consideração um valor médio de perdas naturais, sobretudo quando as pinturas são efectuadas em situações difíceis (no exterior , ao tecto, etc.)
- No caso concreto da pintura de carenas é usual que as camadas de tinta que são aplicadas sucessivamente tenham cores diferentes (ainda que a formulação seja idêntica – variando apenas o pigmento) para garantir que toda a superfície é coberta.

6.3 Controlo da Aplicação dos Esquemas de Pintura

A aplicação de protecção por pintura é acompanhada por inspectores que se certificam dos seguintes aspectos:

- As superfícies estão limpas e decapadas (a tabela mais usada para comparação de qualidade de decapagem consta de uma norma sueca SIS – o grau de decapagem por abrasivo mais usual é o Sa 2 ½ ou o Sa 3; para decapagem mecânica é o grau St 3)
- As condições ambientais satisfazem os mínimos exigidos.
- As tintas aparentam boa qualidade, adequada homogeneidade e viscosidade.
- As ferramentas de aplicação são adequadas
- Os pintores são qualificados para o tipo de trabalho em curso.
- A espessura húmida (medida através de um “pente” próprio) corresponde ao especificado.
- A espessura seca (medida através do aparelho de ultra sons) corresponde ao especificado.
- A secagem / endurecimento é feita em boas condições.
- Os intervalos de repintura são respeitados.

6.4 Notas Diversas

- a) Em construção, as chapas vindas da siderurgia ou do parque de material do estaleiro são previamente decapadas, em máquinas automáticas , que aplicam uma camada de tinta anticorrosiva muito fina destinada a proteger a chapa durante

o fabrico compatível com os esquemas de pintura definitivos e que permitem o oxicorte e a soldadura sem libertação de fumos tóxicos nem deterioração da qualidade desses processos.

Estes primários designam-se por primários de espera (shop primer ou holding primer).

- b) Os metais e ligas que apresentam uma camada de óxido natural, industrialmente difícil de remover como é o caso das ligas de alumínio, ou peça zincadas, devem ser sujeitas à aplicação de um condicionante de superfície (wash-primer), normalmente compostos de fósforo (fostatos e outros), que garante a aderência das camadas de tinta seguinte.
- c) Os esquemas de pintura de carenas que vão ser utilizadas em associação com protecção catódica (correspondendo ao que se designe por protecção conjugada) têm de ser resistentes a saponificação, isto é, a protecção catódica origina uma situação com um teor elevado de alcalinidade, junto aos ânodos; algumas tintas têm tendência a dissolverem-se face a este teor alcalino da água o que não é aceitável em protecção de carenas.
- d) As tintas antivegetativas que se aplicam nas carenas, para evitar a aderência da fauna e flora marinha ao casco podem ser do tipo de matriz libertadora de matéria tóxica, ou do tipo “self-polishing”. A primeira é formulada de acordo com a zona de operação do navio, pois a temperatura, luminosidade, salinidade , etc. da água fazem variar os agentes biológicos e por conseguinte a matéria tóxica tem de estar relacionada com estes. De notar que os fabricantes de tintas produzem tintas antivegetativas de uso geral que têm uma formulação que satisfaz minimamente em águas diversas. O tipo “self-polishing” actua como se fossem desagregando películas extremamente finas que com elas transportam as aderências que na altura estão ligadas à carena (estes tipos de tinta exigem uma velocidade mínima para serem eficazes).

7 DETECÇÃO DE DEFEITOS E ANÁLISE DE FALHAS

7.1 Introdução

A qualidade do fabrico da estrutura ou de um qualquer componente de um navio, requer a existência de projecto de fabrico devidamente executado e a adopção de materiais e processos tecnológicos adequados, assim como o recurso a executantes devidamente qualificados. Embora a conjugação destes factores seja condição necessária para o êxito do fabrico, por vezes não é suficiente e é necessário complementar o fabrico com inspecções e medições que garantam a conformidade do componente com o projecto e que confirmem a ausência de defeitos. O âmbito destas inspecções e medições depende das características físicas do componente, da importância deste quanto às solicitações a que está sujeito e dos processos tecnológicos de fabrico usados.

A verificação da existência de defeitos, a comprovação da conformidade do componente com os requisitos de projecto e até a comprovação deste face às solicitações esperadas, é feita usando procedimentos, designados genericamente por técnicas de **deteccção de defeitos** e que, em regra, não produzem danos no componente; além das medições dimensionais (lineares e angulares) e das verificações geométricas, existem um conjunto de procedimentos agrupados na designação de **ensaios não destrutivos**, além dos ensaios de natureza funcional que frequentemente tomam a forma de **ensaios de sobrecarga**.

A aplicação dos procedimentos de determinação de defeitos e do respectivo nível, isto é, a sua caracterização e quantificação implica o estabelecimento do requisito do nível da sensibilidade dos aparelhos e outros dispositivos de medição e o estabelecimento de um critério de aceitação. Pode-se ilustrar esta afirmação recorrendo a uma medida linear: se for pretendido fazer uma medição linear de uma peça, pretendendo-se que erro do comprimento medido seja da ordem de 5 décimos de milímetro ($\pm 0.5\text{mm}$), considera-se que este valor é o critério de aceitação da peça e naturalmente o aparelho de medida deve poder medir décimos de milímetro, ou medidas inferiores; 0.1 mm será a sensibilidade do aparelho de medida.

Para além da verificação da qualidade do fabrico, as técnicas de deteccção de defeitos são também usadas no decurso da vida útil das estruturas e dos componentes dos navios, não só numa perspectiva de verificação periódica da integridade e do estado do material, como também, no caso de ocorrência de uma avaria, como contribuição para a análise das respectivas razões de ocorrência.

Convém referir ser frequente que os danos que se observam em consequência da avaria carecem de análise no sentido de determinar efectivamente qual o defeito ou defeitos que estiveram na origem da referida avaria. Daí a necessidade de durante a análise das falhas ou avarias, além de se ter presente a configuração do sistema que avariou e as solicitações a que estava sujeito, ser necessário efectuar uma pesquisa exhaustiva dos defeitos existentes no sentido de determinar as razões da situação que motivou a investigação.

De uma forma geral pode-se dizer que o nível de aceitabilidade dos defeitos tem de estar relacionado com a influência desses mesmos defeitos e da sua progressão, face às cargas, isto é, os defeitos aceitáveis devem ser inferiores aos que provocarão danos

ou avarias. Por outro lado deve-se também referir que o nível de defeitos aceitáveis deve ser compatível com o processo de fabrico disponível, isto é, não se pode exigir que os defeitos sejam inferiores ao que é inerente ao processo de fabrico adoptado; para que seja possível aceitar os defeitos é então necessário que no decurso do projecto se estabeleça a forma do componente e se dimensione o mesmo tendo em conta as limitações do processo de fabrico disponível; se existir incompatibilidade entre estes aspectos, isto é, se os defeitos inerentes ao processo de fabrico disponível não forem aceitáveis face às exigências do dimensionamento e configuração, haverá que escolher outro processo de fabrico.

7.2 Métodos de Inspeção não Destrutiva

7.2.1 Generalidades

Os métodos de inspecção não destrutiva, ou ensaios não destrutivos (END) são um conjunto de técnicas e de ensaios destinados a avaliar a ausência de defeitos ou anomalias estruturais, nos componentes mecânicos, sem lhes afectar a capacidade de desempenhar a sua função.

Estes métodos visam essencialmente a detecção de defeitos superficiais ou defeitos internos que constituem uma descontinuidade estrutural, fissuras, poros, inclusões de impurezas, ausência de aderência, etc. Complementarmente, algumas das técnicas adoptadas visam a determinação da composição e de algumas propriedades dos materiais sujeitos à inspecção.

Como se disse, estes métodos têm como característica essencial o facto de não exigirem a destruição do material inspeccionado; por essa razão diferenciam-se dos métodos laboratoriais clássicos destinados à determinação de propriedades, usando provetes que durante os ensaios são transformados ou destruídos.

A maior aplicação dos END, corresponde às fases de construção, como função de controlo de qualidade e de utilização, como avaliação do estado do material. No primeiro caso, a aplicação à construção soldada tem uma importância fundamental; no segundo caso, os END são muito importantes para que numa forma económica e segura, se avalie o estado do material em funcionamento, se controle a evolução dos defeitos detectados e se determine a necessidade de execução de operações de manutenção e reparação.

Constituem campo privilegiado do uso dos END a indústria aeronáutica, as centrais nucleares, os reservatórios de pressão e, no caso das aplicações navais, as estruturas offshore e os submarinos.

Citou-se anteriormente, que uma aplicação corrente dos END na indústria naval, se refere à avaliação da integridade das soldaduras, na construção e na reparação. Normalmente, em construções e em reparações de envergadura, o estaleiro organiza um programa de ensaios não destrutivos, que é sujeito à aprovação por uma entidade competente para o efeito.

A tabela 2 indica os ensaios não destrutivos disponíveis, mais vulgarizados.

Nas alíneas seguintes, serão passados em revista os ensaios mais correntes em engenharia naval, seus méritos e suas aplicações.

Tabela 4 MÉTODOS DE INSPECÇÃO NÃO DESTRUTIVA

	MÉTODO	APLICAÇÃO	ESTADO DE UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA	
1	Inspeção Visual	Defeitos superficiais	Muito utilizado	com ampliação sem ampliação
2	Líquidos Penetrantes	Defeitos superficiais	Muito utilizado	Normais Fluorescentes
3	Partículas Magnéticas Magnetoscopia	Defeitos superficiais e sub-superficiais de pouca profundidade	Muito utilizado	partículas secas emulsionadas
4	Ataques Químicos	Detecção de fendas Transform. Fase superficial	Muito utilizado	Muito utilizado
5	Ataque Anódico	Transform, Fase Sob cromagem	Em desenvolvimento	
6	Correntes Induzidas -Eddy Current-	Defeitos superficiais Inclusões e defeitos sub-superficiais Alteração da dureza superficial, composição e micro-estrutura Deformação plástica Transform. Fase superf. Análise tensões residuais Fadiga sub – sub-superf.	Muito utilizado Muito utilizado	Especializado Especializado Em desenvolvimento Em desenvolvimento Em desenvolvimento
7	Ultrasons	Inclusões e defeitos superficiais Defeitos superficiais	Muito utilizado	Especializado
8	Emissão Acústica	Detecção de fissuras e sua propagação (acompanhamento)	Especializado (usado em estruturas offshore)	
9	Radiografia – Raios x - Raios Y - Neutrões	Defeitos subsuperficiais Defeitos subsuperficiais; Eficiência da junção de dois materiais de densidade semelhante Homogeneidade das ligas	Muito utilizado Especializado Em desenvolvimento	Em desenvolvimento
10	Vibrações	Detecção de fissuras	Especializado; utilização	

7.2.2 Inspeção Visual

Trata-se do END mais vulgar e económico.

Quando devidamente executado, é considerado como um dos métodos de garantia de qualidade mais eficaz, pois permite uma informação rápida e algumas vezes única, sobre determinados defeitos. Em soldadura, a inspeção visual permite verificar se as zonas a soldar estão limpas, preparadas e ajustadas; após a soldadura, pode-se verificar a regularidade superficial do cordão, geometria, alinhamento, etc., permitindo uma imediata correcção, se tal for necessário.

No entanto, a inspecção visual tem diversos inconvenientes como por exemplo:

1. depende em larga escala da experiência do executante
2. não produz registo, a não ser por métodos secundários, designadamente a fotografia
3. a acuidade visual limita a detecção de defeitos
4. apenas são potencialmente visíveis os defeitos superficiais

De notar que o uso de dispositivos amplificadores (lupas) aumenta a potencialidade deste método.

7.2.3 Método das Partículas Magnéticas

Neste método, o metal base é magnetizado pela aplicação de uma corrente eléctrica que origina um campo magnético. Este campo, nas zonas com descontinuidade, orienta as partículas magnéticas finamente divididas e previamente aplicadas na superfície do metal base. Esta orientação, que ocorre quando as descontinuidades ou falhas existem à superfície ou imediatamente sob a mesma, é devida a um par de pólos magnéticos que atraem as referidas partículas.

Esta técnica tem uma sensibilidade direccional, o que a torna muito eficaz quando existem defeitos lineares, desde que os pólos de corrente sejam devidamente aplicados - ver fig. 2.1

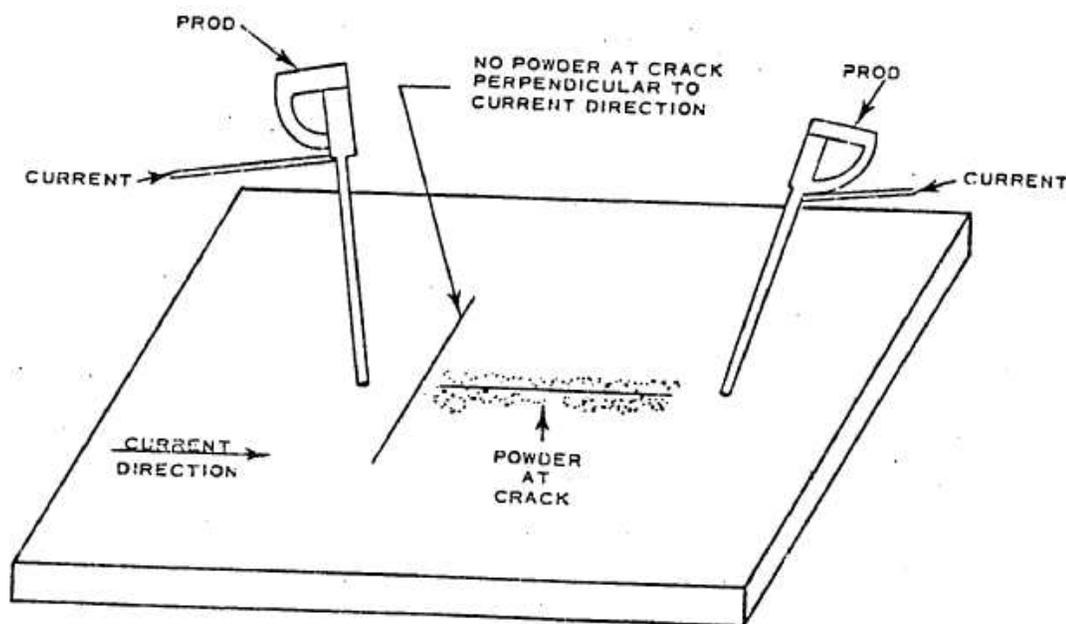


Figura 2.1

Outros aspectos relevantes são:

- Apresenta resultados imediatos
- Requer o concurso de um técnico qualificado
- Não produz registos directos

- Não é aplicável a materiais não magnéticos
- Detecta defeitos superficiais e subsuperficiais

É usado em soldaduras, sobretudo no controle de defeitos nos cordões iniciais e intermédios; é também usado em fundições e em peças forjadas. Ainda em soldaduras, é bastante usado em cordões de canto, onde a inspeção radiografia não é aplicada e a inspeção ultra-sónica é difícil.

De notar que há necessidade de efectuar uma desmagnetização posterior, além de requerer uma limpeza prévia das superfícies da peça a ensaiar.

Comercialmente, as partículas magnéticas podem apresentar-se na forma seca ou emulsionadas em líquido apropriado.

Embora o investimento inicial na máquina seja significativo, a sua aplicação é económica.

Convém notar que alteração no fluxo magnético evidenciado pela orientação das partículas pode ser devido não só às discontinuidades anteriormente referidas como também devido a alterações na permeabilidade magnética do material, devido a tratamento térmico localizado, devido às soldaduras, ou devido a outras razões anómalas.

7.2.4 Líquidos Penetrantes

Neste método, usa-se um líquido penetrante de baixa tensão superficial que se introduz nas fissuras. Depois de remover o líquido penetrante em excesso, aplica-se um "revelador" que faz o contraste entre a superfície que fica coberta pelo revelador e as zonas com defeito, que mantêm a coloração do líquido penetrante.

Este método, que é extremamente eficaz para defeitos superficiais, é económico e de fácil e generalizada aplicação e interpretação. Pode ser aplicado em todos os materiais excepto em materiais porosos e não requer equipamento especial (apresentam-se comercialmente em latas com pulverizador). Não produz registos directos.

Os vapores são tóxicos, pelo que a aplicação dos líquidos penetrantes requer arejamento, sempre que for executada em locais fechados.

Em zonas de difícil acesso e sem possibilidade de iluminação é possível aplicar um líquido penetrante fluorescente, visível com luz ultravioleta.



Figura 18 Inspeção por líquidos penetrantes em painel de alumínio (AA).

7.2.5 Radiografia

Este método é necessário para terminar a integridade de soldaduras e de peças forjadas e vazadas. Emprega uma fonte de radiação electromagnética - Raios X ou Raios Y, que penetra segundo a espessura do material a investigar. Um filme adequado regista a radiação transmitida. As discontinuidades, com material de densidade diferente ou na ausência de material, alteram a propagação das radiações e impressionam o filme de forma diferente (a passagem de mais radiação escurece o filme).

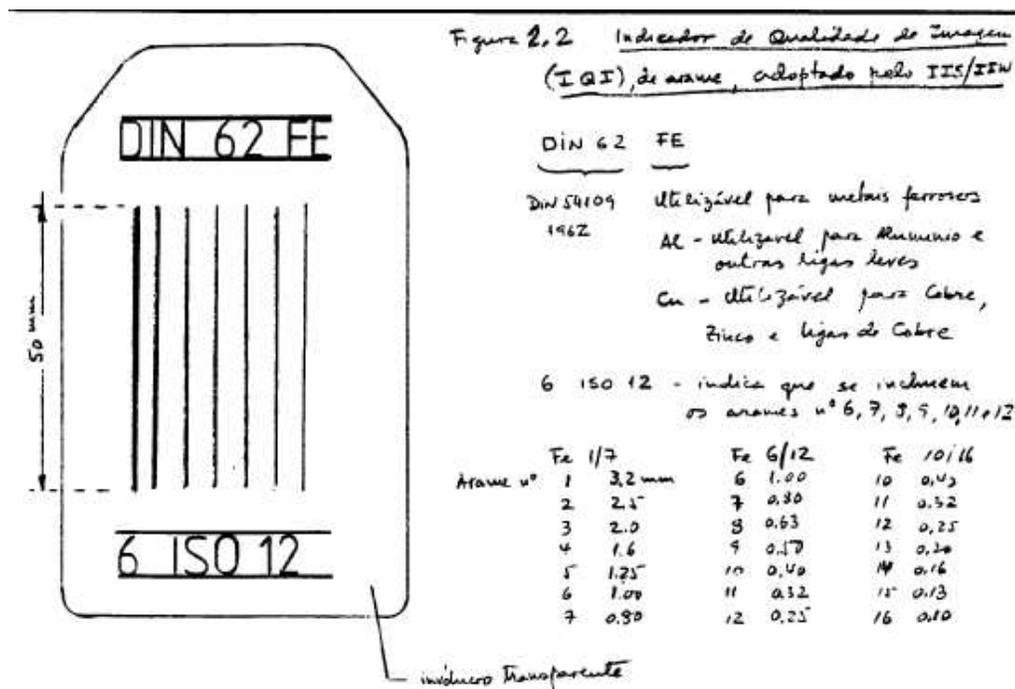
A utilização de radiografia requer que se tomem em consideração determinados factores, como sejam:

(1) **Segurança:** as radiações apresentam um perigo para o operador e para os circundantes, quando estes não estiverem protegidos. Este facto requer precauções especiais na sua utilização. Também a armazenagem do material requer precauções especiais.

(2) **Seleção da Fonte de Radiação:** deve estar em conformidade com a densidade e a espessura do material, para garantir uma adequada sensibilidade. O nível de sensibilidade é controlado pelo uso de indicadores de qualidade de imagem (I Q I) - fig. 2.2. - que são colocados na peça a radiografar.

(3) **Interpretação dos Resultados:** requer pessoal técnico qualificado e experiente, pois a apreciação é subjectiva.

(4) **Requisitos Radiográficos:** as sociedades de classificação e outros organismos estipulam as exigências em termos de número de radiografias, sua localização e níveis de aceitação. Em alguns casos, nas estruturas onde se exige um elevado nível de fiabilidade, todas as soldaduras topo a topo são radiografadas (como é o caso dos submarinos e de determinados reservatórios de pressão)



A possibilidade de se obter um registo permanente, directo, foi fundamental na utilização generalizada que a radiografia tem em construção naval.

O padrão aceitável em construção naval é o "padrão verde" da "coleção de Referências do Instituto Internacional de Soldadura (IIW)"; isto significa que a qualidade de soldaduras em construção naval deve ser tal que as radiografias apresentem registos iguais ou melhores que a coleção de radiografias de referência, constantes da coleção do IIW, sob a classificação "verde".

A radiografia não pode ser aplicada em cordões de canto, em fendas capilares e em delaminações planares segundo o plano de laminagem, por não dar resultados fidedignos.

A radiografia é muito útil e de elevada confiança na detecção de defeitos volumétricos (tridimensionais), tais como porosidades e inclusões sólidas. A detecção de fendas e de faltas de fusão e de penetração nem sempre é possível, dependendo de condições especiais - orientação do feixe e dimensão do defeito.

7.2.6 Ultra-sons

É um método alternativo ou complementar da radiografia. É também extensivamente usado na medição de espessuras e na detecção de defeitos de laminagem e de falta de adesão de camadas planares.

O princípio da utilização da radiação ultra-sónica, na detecção de defeitos é indicado na fig 2.3; um impulso ultra-sónico gerado por um cristal é transmitido segundo um determinado ângulo, através do material sujeito à inspecção. O impulso continua até que atinge a superfície e é reflectido até ao transdutor; qualquer descontinuidade actua como reflector e o seu tamanho, orientação e geometria, determina a porção de impulso que é reflectida.

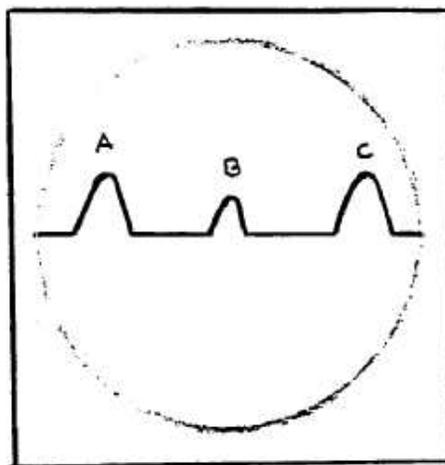


Figura 2.3 a
Oscilograma obtido
por ultra sons

A representa o impulso da emissão, cuja reflexão é o impulso C; o impulso adicional B representa um defeito na zona explorada

ondas longitudinais

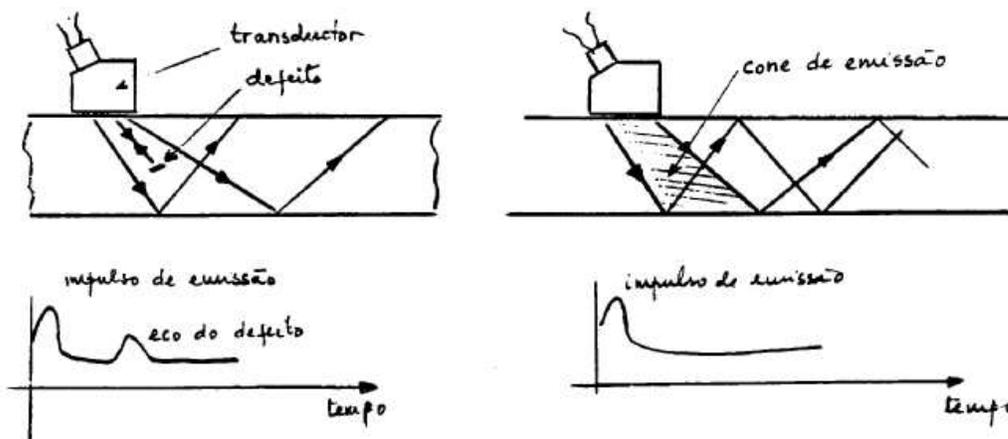


Figura 2.3 b Oscilograma obtido por ultra-sons - ondas transversais

Tal como a radiografia, este método requer operadores especializados e experientes, dada a natureza subjectiva da avaliação dos resultados.

Por dificuldades na propagação do som, sobretudo entre o transdutor e a superfície de contacto na peça, este método tem uma fiabilidade relativamente reduzida. Os equipamentos mais correntes não permitem um registo directo, são relativamente caros e a sua sensibilidade é de difícil aferição.

Como já se focou, requer contacto físico com a peça sujeita ao ensaio, através de uma superfície plana e lisa.

Tal como para a radiografia, existem normas internacionalmente aceites, quanto à aplicação, interpretação e aceitação dos resultados dos métodos de detecção de defeitos por ultra-sons .

Na Tabela 5, apresenta-se uma comparação entre a radiografia e os ultrasons.

No que se refere à construção soldada, os ultra-sons são particularmente adequados a juntas de geometria complexa, por se poder aplicar diferentes tipos de ondas, utilizando diferentes sondas (transdutores) com diferentes ângulos, dimensões e características. é também o método corrente mais eficaz para medir a profundidade dos defeitos.

Tabela 5 Diferenças entre o Ensaio Radiográfico e os Ultra-sons

Qualidade	Radiografia	Ultra-sons
Sensibilidade à descontinuidade (fissuras, escória linear e imperfeições)	menos sensível	Mais sensível
Falta de fusão generalizada e inclusões de escória	mais sensível	Menos Sensível
Interpretação das Indicações	indica forma e Dimensão	Maior Dificuldade
Distância do defeito à superfície da soldadura	não indica	Indica
Registos	Disponíveis	Usualmente não disponíveis
Dependência de julgamento subjectivo na interpretação dos defeitos	Pouco	Mais Dependente
Segurança	requer maiores preocupações	
Facilidade utilização - custo	Inferior	Mais elevado
Gama de espessuras aplicáveis	Limitada	Ilimitada
Fiabilidade do método	Superior	

7.2.7 Algumas notas sobre outros métodos END

Dos restantes métodos, cumpre referir alguns aspectos pontuais de interesse:

O *detector de emissão acústica*, permite o acompanhamento permanente, que regista alterações de ruído produzidas pela estrutura, quando a energia elástica de deformação se liberta, como é o caso em que ocorre uma falha ou se propaga uma fissura de um membro estrutural. Usa-se em estruturas de grande responsabilidade onde o acesso para ensaio é difícil ou dispendiosa, como é o caso das plataformas

offshore. Como se adivinha, este tipo de detecção é frequentemente perturbado por ruídos estranhos, como por exemplo os ruídos provenientes do funcionamento ou de embates, requerendo técnicas de filtragem e de detecção sofisticadas e dispendiosas.

O *método das correntes induzidas* (correntes de Eddy) é usado, em outros campos de actividade, ocupando o domínio do método das partículas magnéticas. Baseia-se nos princípios da indução eléctrica, mostrando uma alteração de campo quando existe descontinuidade; pode ser usado em peças condutoras de electricidade; embora seja um método versátil, é pouco sensível.

Também é frequentemente considerado um END, o ensaio ou *prova hidráulica*; nesta prova, o reservatório a ensaiar é cheio com um líquido água ou óleo e é submetido a uma pressão superior à pressão de trabalho, seguida da investigação e pesquisa de eventuais fugas, pelo exterior do reservatório. Também, em determinadas condições, pode-se adoptar uma prova pneumática em vez de uma prova hidráulica.

O *ensaio de dureza* é também considerado como END a partir do qual se pode deduzir o estado superficial do corpo ensaiado, e numa forma aproximada, a tensão de rotura (excepto nos casos de material com tratamento superficial de endurecimento).

7.3 Detecção de defeitos

Como já foi referido na Introdução, a detecção de defeitos processa-se durante o fabrico, quer nas diversas fases que o compõem, quer no final do mesmo e processa-se igualmente no decurso da vida útil do componente.

A pesquisa de defeitos é feita com recurso às capacidades sensoriais do executante, designadamente a visão e o tacto e também com recurso a procedimentos que requerem equipamento específico e consumíveis, como é o caso dos ensaios não destrutivos. O facto de não se detectarem defeitos não significa que eles não existam; podem não ser detectados devido ao nível de acuidade e sensibilidade dos meios de detecção usados ou pura e simplesmente podem não estar a usar-se os meios de detecção adequados.

A questão da relação entre as potencialidades do processo de fabrico, a qualidade dos meios de detecção, os requisitos de qualidade do componente e o correspondente nível de aceitabilidade dos defeitos é um aspecto da maior relevância e que deve ser considerado por todos os intervenientes.

A existência de defeitos não determina por si só a necessidade de correcção ou reparação; existem defeitos aceitáveis face aos requisitos de qualidade do componente, designadamente porque se constata que não aumentam durante a vida útil do componente; os defeitos que embora sejam aceitáveis face aos padrões de aceitação, mas que evidenciem uma clara tendência para o aumento atingindo valores inaceitáveis com o desenrolar da vida útil operacional do componente devem ser eliminados ou corrigidos. A análise de tendência é um instrumento importante na formulação das decisões sobre a reparação dos defeitos ou danos do componente.

O projectista deve estabelecer o critério de aceitação de defeitos associado ao projecto e este critério deve ser objectivamente aceite pelo fabricante.

Uma nota final importante é a necessidade de garantir que todos os aparelhos de detecção de defeitos e os aparelhos de medição em geral, usados em processos de

fabrico e usados nas inspecções durante a vida útil do componente, devem ser periodicamente calibrados ou referidos para se garantir que as medições e os registos são fidedignos; as técnicos executantes das medições devem também ser qualificados; No caso das operações de controle de qualidade durante o fabrico, esses técnicos devem ser independentes da estrutura fabril que realizou o fabrico.

Em engenharia naval, assume particular relevância a qualidade do fabrico do casco e de alguns dos componentes e estruturas instalados a bordo, directamente relacionados com a segurança e a sobrevivência do navio.

Genericamente as áreas onde existe maior incidência das actividades de detecção de defeitos são:

Na construção naval:

- Dimensões e formas das estruturas
- Defeitos na construção soldada
- Defeitos da protecção superficial (revestimento por pintura)
- Estanqueidade do casco, compartimentos e tanques.
- Alinhamento de equipamentos e componentes dinâmicos

Na reparação naval:

- Desgaste mecânico
- Desgaste por corrosão e defeitos de protecção superficial
- Estanqueidade do casco, compartimentos e tanques
- Alinhamentos de equipamentos e componentes dinâmicos.
- Detecção de fendas devidas a esforços dinâmicos (fadiga)

7.4 Considerações sobre a análise de falhas

Apesar do cuidado posto na detecção de defeitos, constata-se que ocorrem avarias resultantes de falhas do material; estas falhas podem ser devidas a defeitos dos materiais usados, a deficiências dos processos de fabrico, a erros dos executantes ou dos operadores, a erros de concepção e projecto e a sobrecargas inopinadas.

As avarias devidas a falhas provocam frequentemente interrupção de operações, danos pessoais e outros prejuízos; as avarias são alvo de peritagens que procuram determinar a sequência dos eventos e as razões das falhas.

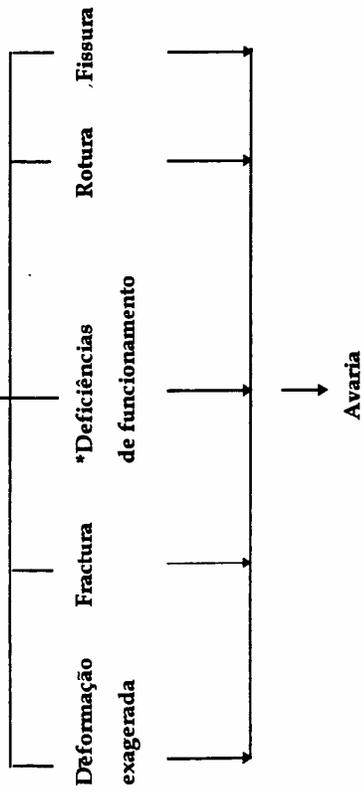
As peritagens de engenharia, pressupõem não só percepção e interpretação dos modelos de funcionamento, das solicitações, dos comportamentos dos componentes e a história do sistema (danos anteriores, condições ambientais, etc.) como também dos mecanismos de falha aplicáveis aos materiais em uso, quando sujeitos às solicitações ambientais que na situação foram detectadas.

Os diagramas da figura 4.1 mostram alguns modelos de avaria apropriados aos navios e seus componentes.

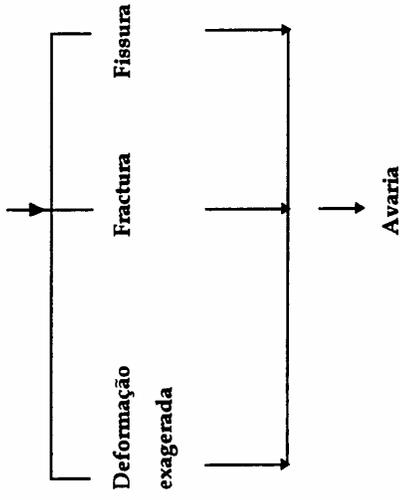
A antecipação do mecanismo de falha poderá, para cada componente e considerando as condições a que estará submetido, orientar os aspectos de selecção de materiais, com vista a garantir uma vida útil isenta de avarias (o quadro 4.1 sintetiza alguns aspectos do comportamento mecânico dos materiais, relacionando-os com a natureza do carregamento, condições de operação (temperatura) e os mecanismos de falha.

ESTRUTURAS E COMPONENTES MECÂNICOS - N^o DELOS DE AVARIA

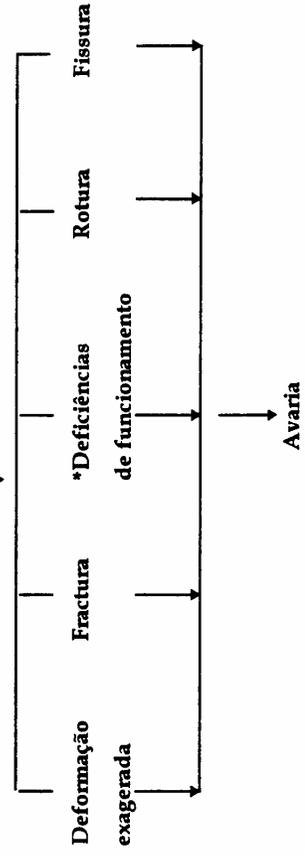
Redução de massa útil
 - desgaste mecânico
 - corrosão



Alteração de propriedades
 - fragilização
 - fluência
 - redução de coesão molecular
 - alteração de composição



Sobrecarga ou Subdimensionamento



* desalinhamento, sobrecarga etc.

Guia generalizado para seleccionar material em função de um possível mecanismo de falha

Mecanismo de Falha	Tipo de solicitação			Tipo de tensão			Temperaturas de operação		Critério geralmente útil para a selecção do material	
	Estático	Repetido	Impacto	Tracção	Com-pressão	Corte	Baixa	Ambiente		Elevada
Fractura frágil	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		Temperatura de transição (segundo ensaio resistência charpy V) Tenacidade à fractura K _{IC}
Fractura dúctil *	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Tensão de resistência à tracção (tensão de rotura tangencial) Tensão de cedência ao corte (tensão cedência)
Fadiga multíciclica		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Tensão de resistência à fadiga, incluindo factores que a reduzem.
Fadiga oligocíclica		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ductilidade estática disponível Picos de deformação plástica cíclica determinada nas zonas de concentração de tensões durante a vida da estrutura
Fadiga com corrosão		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Fadiga com corrosão para o metal e ambiente no tempo de vida prevista
Encurvadura/Instabilidade	<input type="radio"/>				<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Modulo de elasticidade e tensão de cedência à compressão
Cedência generalizada *	<input type="radio"/>				<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Tensão de cedência
Fluência	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Taxa de variação da extensão por fluência (veloc. de deform) Tensão de rotura para a temperatura e vida prevista **
Fragilização pelo hidrogénio ou agentes cáusticos	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Estabilidade sob condições simultânea de tensão e presença de hidrogénio e outros ambientes **
Corrosão sob tensão	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Tensões residuais ou impostas e resistência à corrosão no ambiente. Tenacidade à fractura K _{IC} **

* apenas se aplica a metais dúcteis

** dependentes do tempo