

Tecnologia dos Materiais

Prof. Suzy Pascoali

Introdução

Competência: Compreender a importância da tecnologia de materiais para o técnico eletromecânico

Formas de avaliação

Tecnologia dos Materiais

Avaliação objetiva 30 %
Aulas práticas 30 %
Exercício em aula 20 %
Situação problema 20 %

E – Excelente
P – Proficiente
S – Suficiente
I – Insuficiente

Humanidade X materiais

| Evolução histórica | | Ano | Material |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------|---|
| Pré-história | Idade da Pedra | 25.000 AC até 6.500 AC | Madeira Pedra lascada Pedra polida |
| | | 6.500 AC até 1.500 AC | Cobre Estanho Bronze Ferro Cerâmica |
| Proto-história | Idade dos Metais | | |
| História | Idade Antiga ou Antiguidade | 4.000 AC até 500 AC | Vidro |
| | Idade Média ou Medieval | 500 até 1.500 | Ligas metálicas |
| | Idade Moderna | 1.500 até 1.800 | Concreto |
| | Idade Contemporânea | 1.800 até os dias atuais | Polímeros |

Materiais de construção mecânica

Metálicos 1200 tipos de aço **Aplicação**

resistência mecânica,
condutibilidade térmica
condutibilidade elétrica,
densidade
e outras

Poliméricos

plasticidade,
usinabilidade,
durabilidade química,
custo,
disponibilidade

Cerâmicos

Mistura de dois ou mais dos três – material composto

Metais



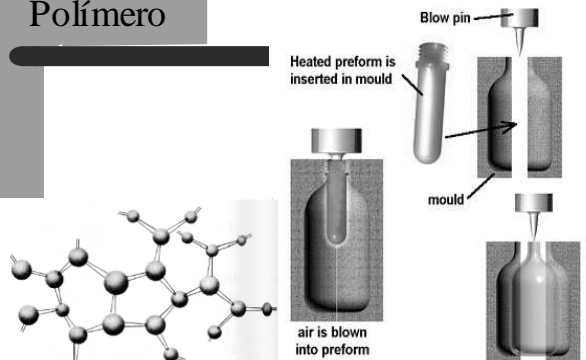
Fusão do cobre



Implante de titânio

- Alta maleabilidade
- Alta condutividade térmica e elétrica

Polímero



Propriedades mecânicas suficientes para muitas aplicações
Alta estabilidade química
Facilidade de conformação – o sonho dos designers

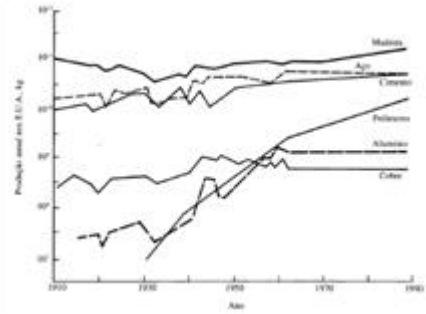
Cerâmica



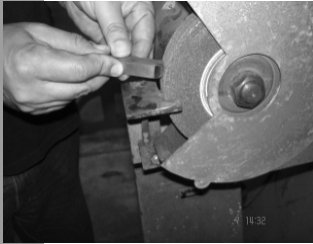
Pastilhas de corte CERMET

- Alta estabilidade química
- Alta dureza
- Alta estabilidade térmica

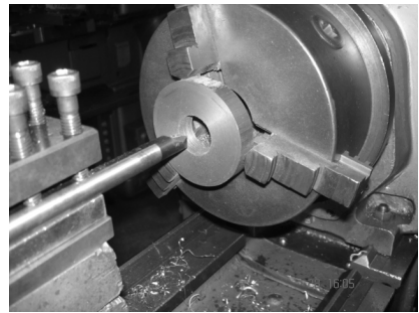
Evolução no uso dos materiais



que/ como realizar
têmpera, afiação,
etc



Usinagem



diferentes velocidades de corte
dependendo do material da
ferramenta e da peça.

| MATERIAL | FERRAMENTAS DE AÇO SERRADO | | | FERRAMENTAS DE CARBETO METÁLICO | |
|---------------------|----------------------------|------------|----------------|---------------------------------|------------|
| | SEBASTE | ACABAMENTO | BOLSA DEBASTAR | SEBASTE | ACABAMENTO |
| ACIL 1045 | 25 | 30 | 10 | 300 | 300 |
| ACIL 1045 | 20 | 25 | 8 | 120 | 160 |
| ACIL 1045/1045 TORÇ | 15 | 20 | 8 | 40 | 60 |
| INOX 12X18Ni9Ti | 20 | 25 | 8 | 15 | 65 |
| INOX 12X18Ni9Ti | 15 | 20 | 8 | 15 | 65 |
| INOX 12X18Ni9Ti | 10 | 15 | 6 | 30 | 50 |
| INOX 15 | 30 | 40 | 10-25 | 300 | 300 |
| INOX 15 | 40 | 50 | 10-25 | 300 | 400 |
| INOX 15 | 60 | 90 | 15-35 | 600 | 700 |
| INOX 15 | 25 | 40 | 10-20 | 120 | 160 |

Questionário em grupo de três

Por que é importante aprender sobre os materiais?

O que estudamos em materiais na unidade curricular tecnologia dos materiais I?

Onde aplicamos o que aprendermos em tecnologia dos materiais I?

...Existe limite para o aprendizado em materiais??

Agradecimentos

A turma do Luis Claudio do Módulo I de 2006 de Florianópolis pelas fotos

Prof. Eleani Maria da Costa – DEM/PUCRS – transparências internet e ao Prof. Hélio Ormeu – CEFET/Flo por disponibilizá-las.

Prof. Fernando Fernandes e Marcelo Martins pela apostila desenvolvida especificamente para o módulo I do técnico em mecânica do CEFET Santa Catarina

A aço Villares pelos produção de catálogos sobre os aços comercializados

As pessoas que criaram e mantêm sites com boa informação, como o cimm, wikipedia e tantos outros.

A todos que escrevem/escreveram e publicaram livros técnicos, de profunda valia para a organização desta unidade curricular

Ao CEFET por ter disponibilizado tempo e equipamento para a realização desta unidade curricular

Pro In I ITM

Introdução

Competência: Compreender a importância da tecnologia de materiais para o técnico mecânico as ligações químicas

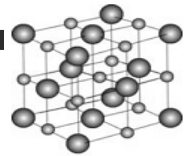
LIGAÇÕES QUÍMICAS

CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES

IÔNICA: : caracterizada pela transferência de elétrons.

Ocorre entre: **METAL** e **AMETAL**
METAL e **HIDROGÊNIO**

Ex: Cloreto de sódio



crystal de cloreto de sódio

Propriedades dos compostos iônicos:

- São sólidos nas condições ambiente
- Apresentam alto ponto de fusão e ebulição
- São condutores de eletricidade quando no estado líquido (fundidos) ou quando dissolvidos em água.
- A maioria dos compostos são solúveis em água.

Questione-se

A Ligação iônica é predominante nos materiais cerâmicos

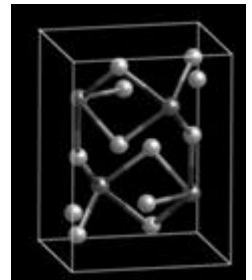
Responda no caderno:
Quais as características dos materiais cerâmicos?

No aço um metal ferroso...

...Existe ligação iônica??

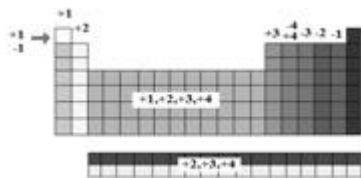
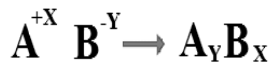
Fe₃C – cementita - carbeto de ferro

- Átomos de ferro conectados com átomos de carbono



Cerâmica
ortorrômbica

DETERMINAÇÃO DA FÓRMULA DE UM COMPOSTO IÔNICO



LIGAÇÃO COVALENTE: formação de pares eletrônicos

Ocorre entre: AMETAL e AMETAL
AMETAL e HIDROGÊNIO



molécula de flúor

- Covalente Simples
- Covalente Dupla
- Covalente Tripla

Propriedades dos compostos moleculares:

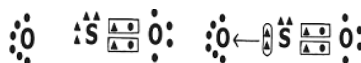
São sólidos, líquidos ou gasosos nas condições ambiente

Apresentam baixos pontos de fusão e ebulição (comparados aos iônicos)

São maus condutores de eletricidade, alguns podem conduzir quando em meio aquoso (ionização).

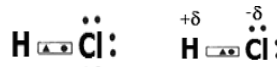
A maioria dos compostos são solúveis em solventes orgânicos.

LIGAÇÕES COVALENTE COORDENADA:



POLARIDADE DAS LIGAÇÕES:

a) Ligações Polares: entre átomos diferentes.



b) Ligação Apolar: entre átomos iguais.



POLARIDADE DAS MOLÉCULAS:

a) Moléculas Polares

Diatômicas: formada por átomos diferentes. Ex: HCl, HF etc.

Molécula que sobra elétrons no átomo central.

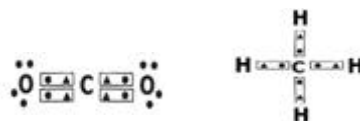


b) Moléculas Apolar:

Diatômicas: formada por átomos iguais. Ex: O₂, N₂ etc.

Substâncias simples: O₃, P₄, S₈ etc.

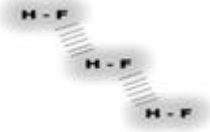
Molécula que não sobra elétrons no átomo central.



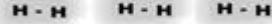
LIGAÇÕES INTERMOLECULARES

Interação dipolo-dipolo: ocorre com moléculas polares.

Pontes de Hidrogênio: Hidrogênio ligado a F, O, N.



Ligação de Van der Waals:



ocorre com moléculas apolares

Como ficam as ligações no aço?

Metal

Metal

LIGAÇÃO METÁLICA : do ponto de vista químico, os metais se caracterizam por possuir elétrons na camada exterior do átomo. Segundo a teoria da ligação metálica, esses elétrons formam uma "nuvem eletrônica", que ocupa faixas limitadas no interior do metal, as chamadas zonas de Brillain, e podem passar facilmente de uma para outra, o que justifica a relativa liberdade de que desfrutam dentro da rede. O sólido metálico seria assim formado pelos núcleos dos átomos mergulhados nessa nuvem eletrônica, que pertence ao conjunto.

Ligação metálica

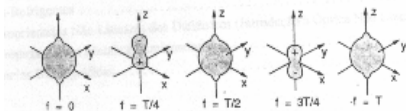
A ligação metálica explica a condutividade elétrica, a maleabilidade, a ductilidade e outras propriedades dos metais.

As ligas metálicas são uniões de 2 ou mais metais, podendo ainda incluir semi-metais ou não.

Exemplos de ligas metálicas são:
aço (ferro + carbono),
bronze (cobre + estanho),
ouro 18kilates (ouro + cobre), etc.

Ligação metálica

- Os átomos de um metal têm grande tendência a perder os elétrons da última camada e transformar-se em cátions. O elétron, entretanto, é simultaneamente atraído por outros íons, que então o perdem novamente e assim por diante. Por isso, apesar de predominarem íons positivos e elétrons livres, diz-se que os átomos de um metal são eletricamente neutros.



ITM

Projeto Integrador I Introdução a tecnologia dos materiais

Como a matéria está distribuída num sólido?

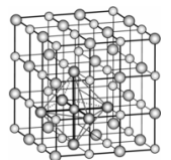
Módulo I

Estrutura cristalina do ferro

Defeitos na rede cristalina

Estrutura cristalina do aço

Célula unitária de um cristal de sal (NaCl). Note a ordenação dos átomos.



- A mesma substância, sob condições de pressão e temperatura distintas, pode formar cristais com células unitárias totalmente diversas. Um exemplo clássico é o Carbono, o qual pode, dependendo das condições, cristalizar sob centenas de formas, indo desde o diamante à grafite, passando pelos fulerenos e pelas inúmeras variantes da fibra de carbono. Também as substâncias orgânicas, dos açúcares às proteínas e ao DNA cristalizam em formas extremamente complexas em resultado do seu elevado peso molecular e complexidade estrutural.

Neste módulo do curso de técnico em mecânica vamos estudar as ligas ferrosas, ok?

Como será que o ferro se organiza?

Sabemos que suas ligações são fortes, na maioria ligações metálicas, com nuvens eletrônicas. Mas como estão os átomos distribuídos nos sólidos?

Atividade prática aqui na sala temática

ITM_3a_Plano_de_aula_estruturacristalina.doc

Exercício

Desenhe dois cubos

- No primeiro coloque uma pequena esfera em cada vértice e outro no centro de cada face.
- No segundo coloque uma pequena esfera em cada vértice mais um no centro do volume do cubo

O ferro

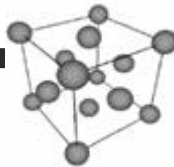
- Número atômico 26
- Massa atômica 55,847 g/mol
- Diâmetro atômico $\approx 2,5 \text{ \AA}$

Ferro

Ferro gama
Cúbica de face centrada
Ferro alfa
Cúbica de corpo centrado

Estrutura cristalina do ferro

- CFC austenita
- CCC ferrita



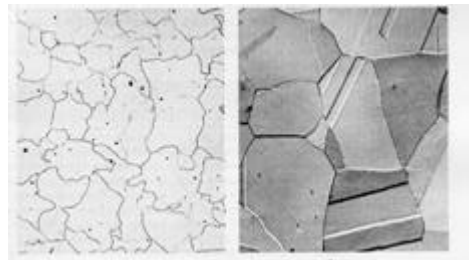
Atividade
Determine a célula unitária CFC e CCC em seu caderno



Sistema Fe - Fe₃C:
"Formas Alotrópicas"

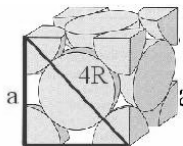
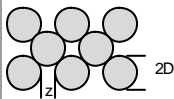
FERRITA

AUSTENITA



Qual será o maior espaço entre dois átomos destas redes cristalinas?

- CFC
- $R = 0,9 \text{ \AA}$
- $2D = a \sqrt{2} = 3,6 \text{ \AA}$
- $Z = a - D = 1,1 \text{ \AA}$

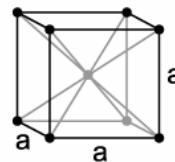
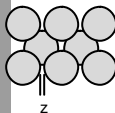


a é o parâmetro de rede

Para que serve esta informação??

Dica: ligas ferrosas

- CCC
- $R = 0,72 \text{ \AA}$
- $2D = a \sqrt{3} = 2,9 \text{ \AA}$
- $Z = a - D = 0,4 \text{ \AA}$



Diâmetro do átomo de carbono = $70 \text{ pm} = 0,77 \text{ \AA} = 0,077 \text{ nm}$

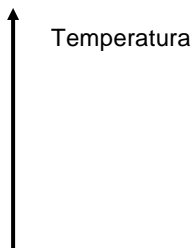
configuração eletrônica ferro: $[\text{Ar}] 4s^2 3d^6$

configuração eletrônica carbono: $1s^2 2s^2 2p^2$

Transformação alotrópica

Ferro puro

- Ferro líquido
- $1534 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ferro delta CCC
- $1392 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ferro gama CFC
- $912 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ferro alfa CCC



Exercício

- Faça em seu caderno uma lista com os novos termos apresentados a você durante estas primeiras aulas.

Rede cristalina

Difícil não conter falhas na rede cristalina

Presença de defeitos cristalinos

Qual a importância tecnológica dos defeitos cristalinos?

Que defeitos são possíveis de ocorrer nesta rede organizada?

Falta de um átomo na rede

Troca de um átomo da rede por uma impureza

Um átomo no interstício da rede

Uma fileira faltante

Uma incrustação

Uma segunda fase

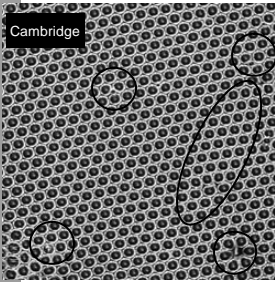
Regiões de encontro de arranjos de rede cristalina

diferentemente orientados

Defeitos cristalinos

- Vacância
- Discordância
- Contorno de grão
- Solução sólida
- Precipitados

Defeitos da rede



- Observe os defeitos cristalinos

Lacuna
 Átomo intersticial
 Átomo substitucional
 Discordância

Exercício

- Qual a importância da difusão no estado sólido?
- Descreva três defeitos cristalinos.
- Como os defeitos cristalinos podem influenciar nas propriedades dos materiais?

Difusão no estado sólido

- Quando damos energia os átomos se deslocam pela rede para a região de menor energia
- Qual a utilidade??
- Para solubilizar uma liga
- Para inserir constituintes na liga
- Quando esfria??
- Pode ocorrer precipitação de outra fase.

Solução sólida



Propriedades dos materiais e microestrutura

- Propriedades independentes da microestrutura
- Módulo de elasticidade
- Temperatura de fusão
- Calor específico

a
r

- Propriedades dependentes da microestrutura
- Condutividade elétrica
- Propriedades de semicondutores

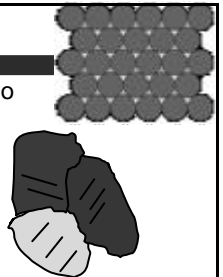
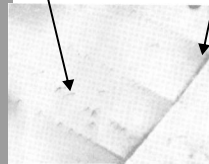
σ_{rup} S_{creep} S_{esc}

Propriedades mecânicas \xrightarrow{f} **microestrutura**

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pontuais} \rightarrow \text{átomos/lacunas} \\ \text{Linha} \rightarrow \text{discordâncias} \\ \text{Superfície} \rightarrow \text{c.j.macla, falha de empilhamento subgrão} \end{array} \right.$

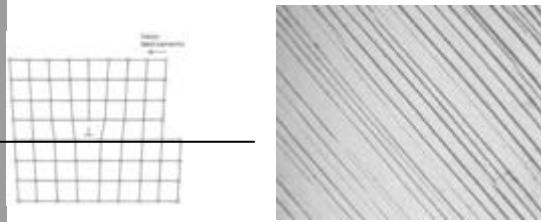
Contorno de grão

Discordâncias num contorno de grão



Cada grão é um único cristal.
 No encontro entre os cristais, há uma região em que os átomos não se organizam perfeitamente na rede,
 Há falhas na rede de um e outro cristal: o contorno de grão

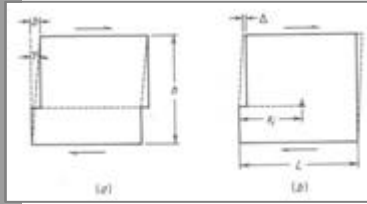
Discordância



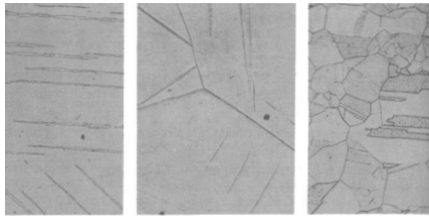
Cobre 500X
W.L. Philips apud Dieter

Falta um plano cristalino na parte inferior
Sobre um plano cristalino na parte superior

Deslocamento de uma discordância na rede cristalina



Maclas



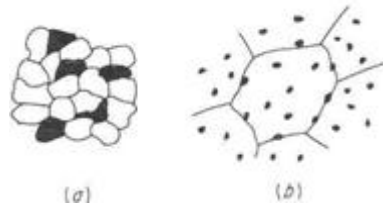
(a) Bandas de Neumann
Ferro

(b) Maclas mecânicas
Polimento zinco

(c) Maclas
recozimento
Au-Ag

Uma parte da região do cristal cisalha, formando um perfeito espelho com a região não cisalhada.
Defeito característico dos aços inoxidáveis 316L

Segunda fase



Pequenos precipitados
Grãos com uma segunda fase

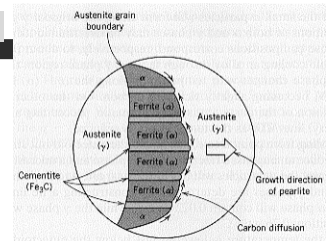
Exemplo: cementita na ferrita, ferrita na austenita na zona crítica

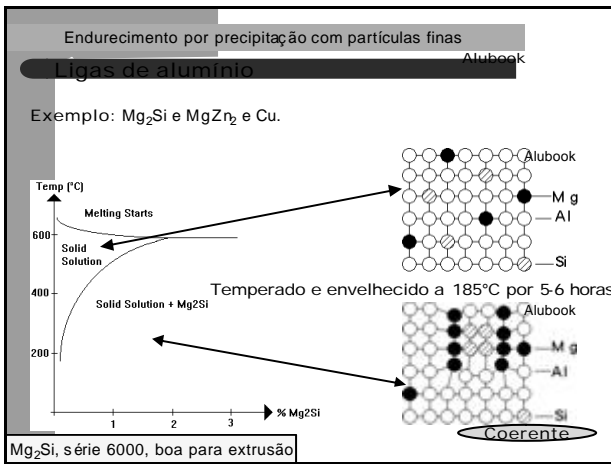
Plano de aula ITM_grao

Atividade prática aqui
na sala temática

ITM_3b_Plano de aula_grao.doc

Cementita na Ferrita





Tecnologia dos materiais

Módulo I

Competência: Selecionar as ligas de ferro-carbono
Compreender a influência da composição nas propriedades

Habilidade: Classificar as ligas ferro-carbono
determinar a influência dos elementos químicos nas propriedades das ligas

Neste módulo do projeto integrador vamos estudar as ligas ferrosas.
Como se apresenta na natureza?

A história do aço

- 1770 A.C. O carvão e o ferro eram enterrados num buraco no chão e soprados com ar por um fole. O ferro depois retirado era forjado

500 A.C. Os chineses faziam ferro carburado – ferro gusa

1350 O forno aumenta de altura e aumenta a concentração de carbono, o ferro fica líquido no fundo do forno. Surgem utensílios dom ésticos

<http://www.arcelor.com/br/cst/>

Siderúrgia

| Minério de ferro | Fórmula | Ferro (%) |
|------------------------------------|-----------------------|-----------|
| Hematita (óxido ferroso férrico) | Fe_2O_3 | 70,0 |
| Magnetita (óxido férrico) | Fe_3O_4 | 62,4 |
| Limonita (óxido hidratado e ferro) | $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ | 59,9 |
| Siderita (carbonato de ferro) | $FeCO_3$ | 48,3 |

- Ferro quarto elemento mais abundante na natureza
Encontrado na forma de óxido

Redução

http://www.gerdan.com.br/port/pops/processo_aco/moviles/home_flash.asp

- O minério de ferro está rico em oxigênio
 - Precisa ser reduzido => processo de redução
 - Num forno coloca-se coque, cal e minério de ferro
 - No alto forno as reduções ocorrem a temperaturas elevadas 1200 C.
- Produz o ferro Gusa

Produção do ferro gusa

Esquema de operação de um alto forno

Alimentador

Transportador

Coque Minério de ferro Calcário

500°C

1200°C

1650°C

Injeção de ar

Saída de ferro gusa

Saída de escória

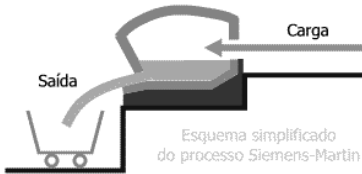
<myspace.eng.br/eng/mat/aco1.asp>

Refino

http://www.gerdau.com.br/port/pops/processo_aco/movies/home_flash.asp

- O ferro Gusa líquido vai para um conversor onde é refinado
- Para ajustes mais finos de composição pode ser refinado novamente num forno elétrico

Ferro esponja é formado através de redução direta com adição de carbono (carvão) e oxigênio (ar).



Aciaria

- Após refino o aço é lingotado
- O lingote aquecido é transformado em tarugo
- O tarugo é laminado em bobinas.



• Decapagem

- Física e química
- Para quebra das carepas

• Laminação

- Chapa sofre tração e compressão
- Produto final uma bobina de espessura controlada

• Galvanização

- Banho de zinco

• Recozimento em caixa

- Restituição das propriedades mecânicas

• Encruamento

- Garante as propriedades mecânicas superficiais

Após o processo de decapagem ocorre a laminação a frio. Na Vega do Sul estes processos são acoplados, o que permite um trabalho de forma contínua. O laminador tem quatro cadeiras (gaiolas) nas quais a chapa é submetida a esforços controlados de compressão e tração, reduzindo sua espessura.



Aciaria

- Laminação a frio

Neste processo é usada uma emulsão de óleo e água, que tem as funções de resfriamento e lubrificação no contato entre a chapa e o cilindro. No processo de laminação, todos os resíduos precisam ser reciclados ou reutilizados.

Após esta etapa, as bobinas, neste ponto denominadas *full-hard*, podem seguir para duas rotas distintas, dependendo do produto final: chapas revestidas ou chapas finas a frio.

- **Decapagem** - Processo de remoção da camada de óxido da superfície das bobinas laminadas a quente.
- **Laminação a Frio** - Processo de redução da espessura das chapas de aço decapadas através de deformação mecânica controlada.
- **Recozimento em Caixa** - Processo de tratamento térmico utilizado para restituir as propriedades mecânicas do aço após sua laminação á frio.
- **Encruamento** - Processo de acabamento superficial e propriedades mecânicas através de baixos valores de redução.
- **Galvanização** - Processo de revestimento da superfície da bobina com uma camada de zinco para o aumento da resistência à corrosão do aço.
- **Linha de Inspeção** - Processo de inspeção final da qualidade do produto antes do envio do produto acabado para os clientes.

Fonte: <http://www.arcelor.com/br/>

Aciaria

Revisão - Questionário

- Quais são os tipos de ligações químicas?
- Quais os grupos de materiais.
- Desenhe rede cristalina do ferro CCC (alfa) e CFC (gama).
- Cite três defeitos que ocorrem na rede cristalina do ferro.
- Se você precisasse selecionar o grupo do material de uma máquina de encher linguiça, qual escolheria e por quê?
- Do ponto de vista ecológico, como você vê a concorrência entre os grupos de materiais?
- Por que o ferro após ser retirado da natureza precisa ser processado? Quais as principais etapas deste processamento?

Eixo temático

Introdução a tecnologia dos materiais

Pro In I
Suzy Pascoali

Competência: Compreender a dependência das fases cristalinas do aço com a temperatura e a composição deste.
Habilidade: Descrever as fases cristalinas e suas propriedades.
Determinar a constituição de fases do aço dada sua temperatura e composição

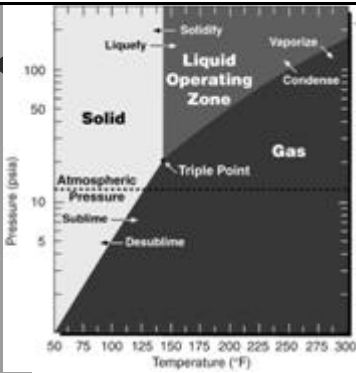


Diagrama de fase
do
hexafluoreto
[JF_6]

- <http://www.metaltech.com.br>
- Apresenta varias defirções

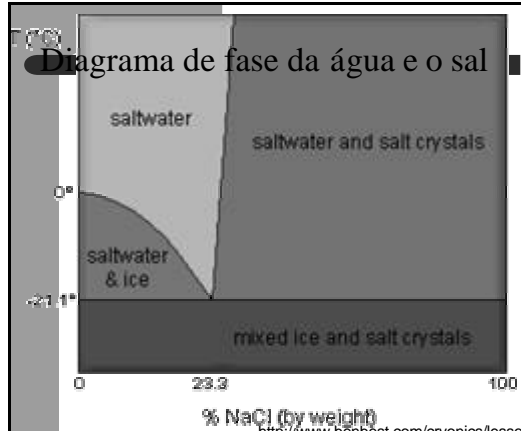
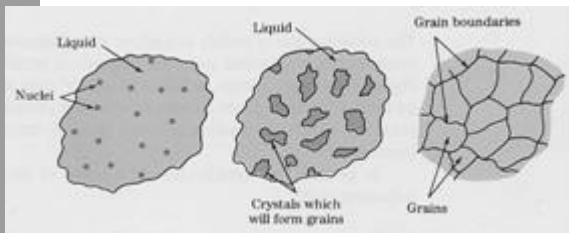


Diagrama de fase da água e o sal

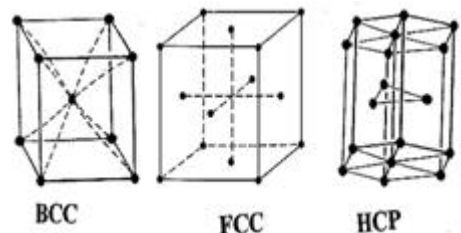
<http://www.benbest.com/cryonics/lessons.html>
http://www.chemistrycoach.com/Phase_diagram.htm

Processo de solidificação



<http://www.benbest.com/cryonics/lessons.html>

Estruturas cristalinas



Como o sólido está organizado

LI MI TE DE SOLUBI LI DA DE

SOLUBI LI DA DE COMPLETA
 SOLUBI LI DA DE INCOMPLETA
 INSOLUBI LI DA DE

Definição: Limite de Solubilidade é a concentração máxima de átomos de soluto que pode dissolver-se no solvente, a uma dada temperatura, para formar uma solução sólida.

- ☞ No caso de líquidos - Uma mistura de sal na água
- ☞ No caso do aço - a fase alfa é uma solução sólida de carbono no ferro.

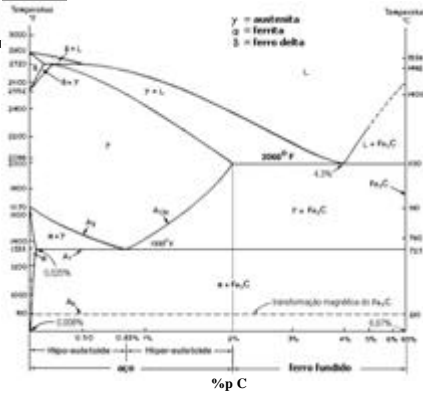
SOLUBI LI DA DE COMPLETA
 SOLUBI LI DA DE PARCIAL
 INSOLUBI LI DA DE

Quando o limite de solubilidade é ultrapassado forma-se uma segunda fase com composição distinta.

- ☞ No caso de líquidos - Uma mistura de sal na água quando se põe sal de mais - cristais de sal precipitam no fundo.
- ☞ No caso do aço - na ferrita, quando o carbono ultrapassa o limite de solubilidade: a cementita precipita no contorno de grão.

Precipita no contorno de grão ???

Diagrama de Fase Fe-Fe₃C

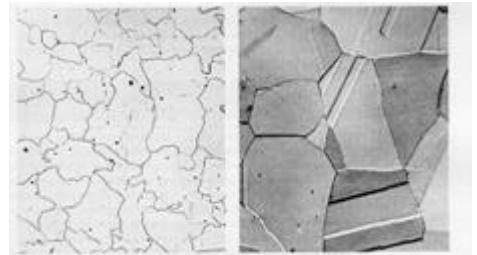


No seu caderno desenhe um diagrama de fases Fe-C

Exemplo: solubilidade do carbono é diferente em cada fase do ferro.

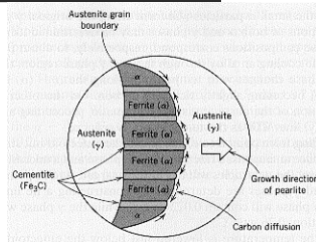
FERRITA

AUSTENITA



EXEMPLO DE SOLUBI LI DA DE INCOMPLETA - parcial

Cementita na Ferrita



Fases

Definição: Fase é a parte homogênea de um sistema que tem características físicas e químicas definidas.

- ◆ Todo metal puro é considerado uma fase
- ◆ Uma fase é identificada pela sua composição química e microestrutura
- ◆ A interação de duas ou mais fases em um material permite a obtenção de propriedades diferentes
- ◆ É possível alterar as propriedades do material alterando a forma e distribuição das fases

Ah?!

Diagrama de Fases (Equilíbrio)

Definição: "é um diagrama utilizado para a determinação das fases presentes numa liga, para qualquer temperatura e composição, desde que a liga esteja em equilíbrio."

- ◆ Termodinamicamente o equilíbrio é descrito em termos da energia livre (*energia máxima que pode ser liberada*).
- ◆ Um sistema está em equilíbrio quando a energia livre é mínima
- ◆ O equilíbrio de fases ocorre quando as fases (e suas características) não se alteram com o tempo.

Fases de Equilíbrio e Fases Metaestáveis

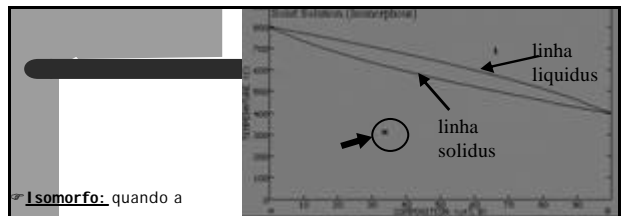
Fases de equilíbrio: suas propriedades (ou características) não se alteram com o tempo. Geralmente são representadas nos diagramas por letras gregas.

Fases metaestáveis: suas propriedades (ou características) mudam lentamente com o tempo, ou seja, o estado de equilíbrio não é alcançado. Apesar disso, não há mudanças muito perceptíveis com o tempo na microestrutura das fases metaestáveis.

Cite exemplos de fases estáveis e metaestáveis do ferro-carbono.

Diagrama de fase

- Uma forma de organizar e facilitar o nosso trabalho
- A seguir seguem alguns tipos de diagramas mais simples que nos ajudarão a entender o diagrama do ferro carbono.
- Como por exemplo saber e calcular qual a quantidade de cada fase presente e a composição.



↳ **Isomorfo:** quando a solubilidade é completa (Exemplo: sistema Cu- Ni).

↳ **Linha "Liquidus":** indica a região no diagrama de fases onde as composições acima são líquidas.

↳ **Linha "Solidus":** indica a região onde todas as composições abaixo são sólidas.

Diagrama de Equilíbrio para Sistemas Binários e Isomorfos

Interpretação do Diagrama de Fases

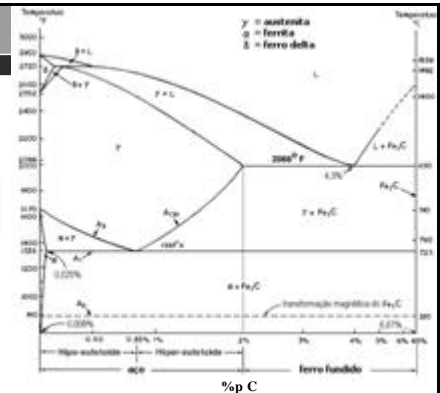
■ **Fases presentes:** localiza-se no diagrama de fases a temperatura e composição desejadas e verifica-se o número de fases presentes.

■ **Composição química das fases:** usa-se o método da "linha de amarração" (isotérma). (Para um sistema monofásico a composição é a mesma da liga)

■ **Porcentagem das fases:** quantidades relativas das fases presentes para uma determinada composição (Regra da Alavanca)

Quais as fases presentes?

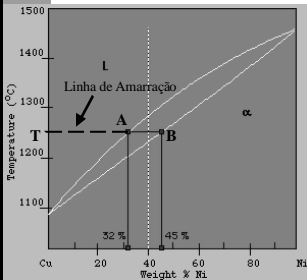
Diagrama de Fase Fe-Fe₃C



Interpretação do Diagrama de Equilíbrio

SISTEMA Cu-Ni

- ◆ Determinação das **fases** presentes e suas **composições químicas**:

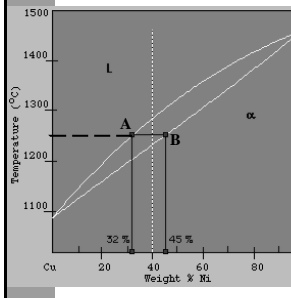


1. Constrói-se uma "linha de amarração" através da região bifásica para uma determinada temperatura "T" da liga;
2. Anotam-se as interseções da "linha de amarração" com as fronteiras (pontos "A" e "B") entre as fases em ambos os lados;
3. Traçam-se linhas perpendiculares à "linha de amarração" a partir dessas interseções até o eixo horizontal das composições, onde a composição em cada uma das respectivas fases pode ser lida.

Interpretação do Diagrama de Equilíbrio

SISTEMA Cu-Ni

- ◆ Determinação das **fases** presentes e suas **composições químicas**:



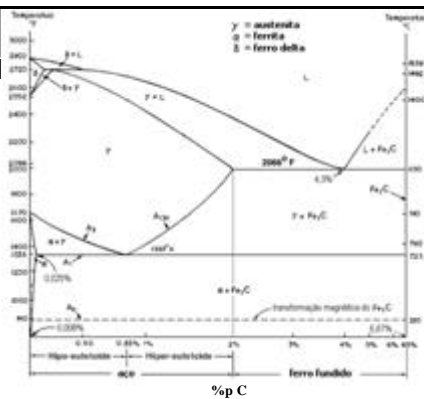
Composições:

Ponto "A" (Liquidus): significa que neste ponto, a esta temperatura, o material está líquido e sua composição é: **32% de Ni e 68% de Cu**

Ponto "B" (Sólidos): significa que neste ponto, a esta temperatura, o material está sólido e sua composição é: **45% de Ni e 55% de Cu**

Quais a **composição** das fases presentes?

Diagrama de Fase Fe-Fe₃C



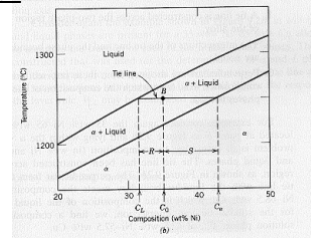
Interpretação do Diagrama de Equilíbrio

◆ "Regra da Alavanca"

- ◆ SISTEMA Cu-Ni: Determinação das **quantidades relativas das fases**.

◆ Quando temos uma liga binária (constituída de duas fases), como a liga representada no ponto "B", é importante determinar a quantidade de cada fase presente nesta liga. Isto é feito com a ajuda da **"Regra da Alavanca"**.

◆ A concentração de Ni presente nas fases líquida (C_L), sólida (C_α) e na liga (C₀), são determinadas diretamente a partir do diagrama ao lado. Com esses valores tem-se naturalmente a composição de cada uma das fases e da liga.



Interpretação do Diagrama de Equilíbrio

◆ "Regra da Alavanca"

Composição da fase **Líquida**:

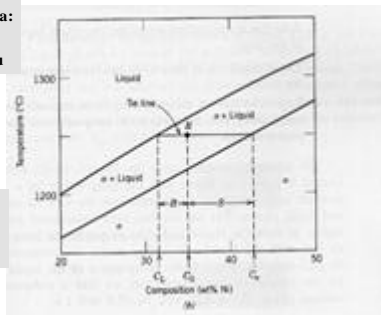
31,5%p Ni + 68,5%p Cu

Composição da **Liga**:

35%p Ni + 65%p Cu

Composição da fase **Sólida**:

42,5 %p Ni + 57,5%p Cu



Lembre-se que: $\%pCu = 100\% - \%pNi$

Interpretação do Diagrama de Equilíbrio

◆ "Regra da Alavanca"

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

W_L = concentração em peso da fase líquida

C₀ = concentração em peso de Ni presente na liga

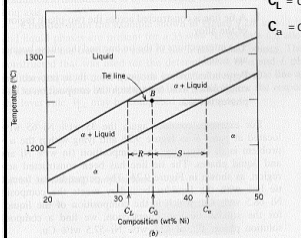
C_L = concentração de Ni presente na fase líquida

C_α = concentração de Ni presente na fase sólida (a)

$$W_L = \frac{S}{R+S}$$

"S" e "R" são as distâncias mostradas na figura, medidas diretamente com a régua.

$$W_L = \frac{42,5 - 35}{42,5 - 31,5} = 0,68$$



Interpretação do Diagrama de Equilíbrio

◆ “Regra da Alavanca”

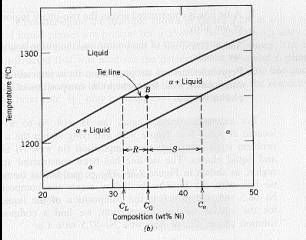
$$W_s = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L}$$

W_s = concentração em peso da fase líquida
 C_0 = concentração em peso de Ni presente na liga
 C_L = concentração de Ni presente na fase líquida
 C_α = concentração de Ni presente na fase sólida (a)

$$W_s = \frac{R}{R+S}$$

“S” e “R” são as distâncias mostradas na figura, medidas diretamente com a régua.

$$W_\alpha = \frac{35 - 31,5}{42,5 - 31,5} = 0,32$$

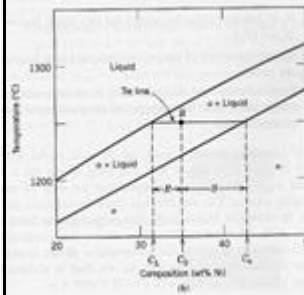


Interpretação do Diagrama de Equilíbrio

◆ “Regra da Alavanca”

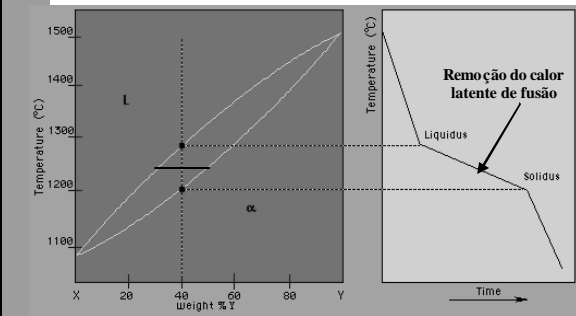
A liga binária Cu-Ni, representada no ponto “B” é composta de: 35%p Ni + 65%p Cu

Nesta liga (ponto “B”) coexistem as duas fases: líquida e sólida (a)



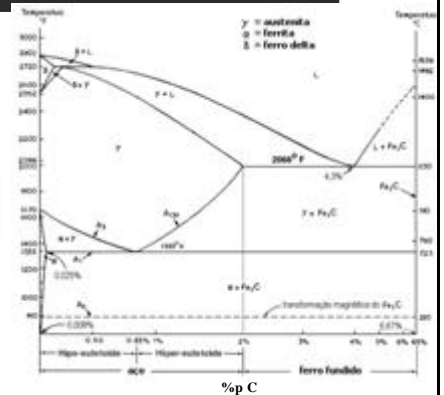
A liga Cu-Ni, representada no ponto “B”, contém 68% de fase líquida e 32% de fase sólida (a)

Curva de solidificação e Remoção do calor latente de fusão



Quais a fração das fases presentes?

Diagrama de Fase Fe-Fe₃C



Exercícios

• Quais as fases presentes na liga Fe-C nas seguintes temperaturas e concentrações de carbono:

- 0,2 %C – Temp Amb.
- 0,36 %C – 800 °C
- 0,9 %C – 1000 °C
- 4,3 %C – 130 °C
- 0,36 %C – Temp Amb.
- 3 %C – 1000 °C
- 4,3 %C – 1148 °C

Desenvolvimento da Microestrutura

- ☞ A microestrutura segue o diagrama de equilíbrio para velocidades de solidificação lentas
- ☞ Na prática, não há tempo para a difusão completa e as microestruturas não são exatamente iguais as do equilíbrio
- ☞ O grau de afastamento do equilíbrio dependerá da taxa de resfriamento
- ☞ Como consequência da solidificação fora do equilíbrio tem-se a segregação, ou seja, a distribuição dos 2 elementos no grão não é uniforme, sendo o centro do grão mais rico com o elemento de maior ponto de fusão. Também chamado estrutura zonada.

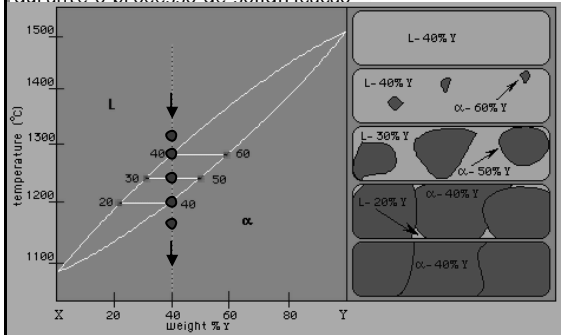
Formação da Microestrutura

- ☞ “Resfriamento “rápido”,
- ☞ fora das condições de equilíbrio.

◆ A distribuição dos 2 elementos no grão não é uniforme, sendo o centro do grão mais rico do elemento com maior ponto de fusão.

Mudança na composição das fases durante o processo de solidificação

“RESFRIAMENTO LENTO”

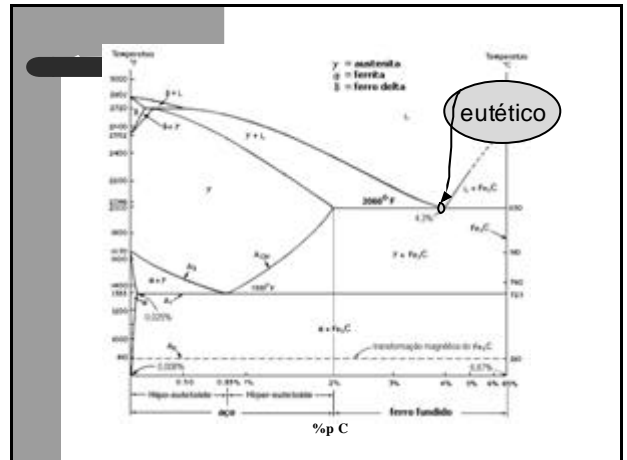


Cite as fases presente em cada ponto
 Calcule a proporção de cada fase na liga
 Determine a quantidade de elemento de liga em cada fase

Sistemas Eutéticos Binários

Reação eutética: ocorre quando passa-se da região onde tem apenas a fase “líquida” para outra região onde coexistem duas fases sólidas (Ex.: Líquido → a + b).

- ☞ Neste caso a solidificação processa-se como num metal puro, no entanto o produto são 2 fases sólidas distintas.
- ☞ A microestrutura do eutético é “lamelar” ou “globular”, com camadas alternadas de fase “a” e “b”.



Exemplo de liga eutética no aço

Líquido Fase g (austenita) + Fe₃C (cementita)

- Temperatura= 1147 °C
- Teor de Carbono= 4,3%

- Ligas de Ferro fundido de 2,06-4,3% de C são chamadas de ligas **hipoeutéticas**
- Ligas de Ferro fundido acima de 4,3% de C são chamadas de ligas **hipereutéticas**

Sistemas Eutéticos Binários

- 1- A linha “liquidus” separa a fase fundida das fases fundida + cristalina.
- 2- A linha “solidus” separa as fases fundida + cristalina de todas as fases cristalinas.

Nota: as linhas “solidus” e “liquidus” são experimentais, ou seja, elas são determinadas a partir da fusão e resfriamento de diferentes composições (diferentes % dos elementos constituintes da liga).

- 3- O “Eutético” é o ponto onde três fases podem coexistir simultaneamente, fases “A”, “B” e o fundido. Na figura apresentada, o Eutético corresponde ao ponto onde tem-se 50% do componente “B”, mas pode ser qualquer percentagem dependendo dos reagentes envolvidos.

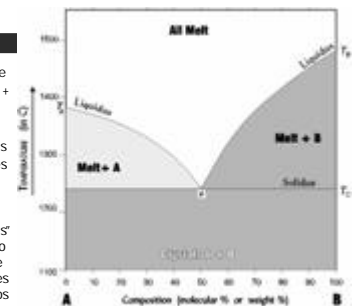


Diagrama de Equilíbrio com Fases Intermediárias

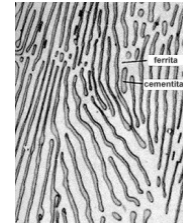
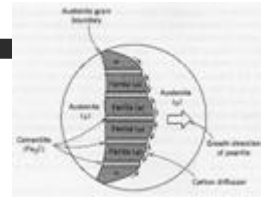
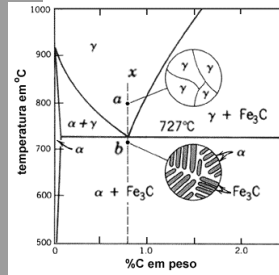
Reação Eutetóide: Ocorre quando uma fase sólida se transforma em duas fases sólidas numa única temperatura.

Austenita => Ferrita e Cementita

Perlita



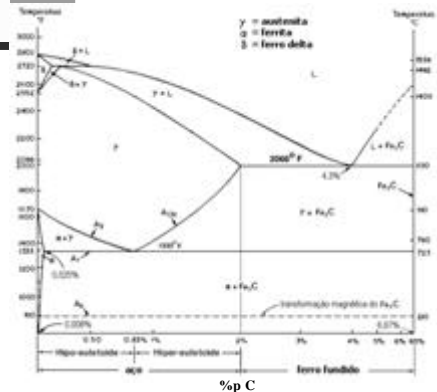
Microestruturas / Eutetóide



Fases no aço

- Descreva cada uma das fases cristalinas presentes no aço.
- Diagrama de fase. Descreva o que você já sabe sobre o diagrama de fase da liga ferro-carbono!!

Diagrama de Fase Fe-Fe₃C



Determine o ponto eutético e o eutetóide

Sistema Fe - Fe₃C
Ferro Puro

Ferro Puro: contém até 0,002% de Carbono

Aço: de 0,002% até 2,06% de Carbono

Ferro Fundido: de 2,1% a 4,5% de Carbono

Sistema Fe - Fe₃C:
"Ferrita"

FERRITA = FERRO α

- Características:
- Estrutura: CCC (até a temperatura de 912 °C)
- Material ferromagnético a temperaturas inferiores a 768 °C
- Densidade: 7,88 g/cm³
- Solubilidade máxima do carbono: 0,002%pC a 727 °C
- Baixa dureza e dúctil

Sistema Fe - Fe₃C:
"Austenita"

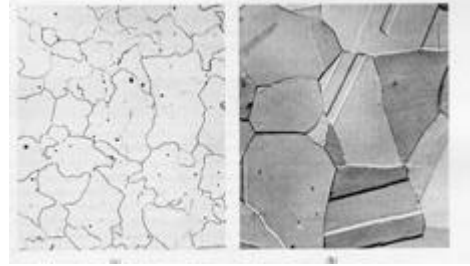
AUSTENITA – FERRO g

- Estrutura: CFC (tem + posições intersticiais)
- Forma estável do ferro puro a temperatura entre 912 °C a 1394°C
- Não é ferromagnética
- Solubilidade máxima do carbono: 2,14%pC a 1147 °C
- É mais dura

Sistema Fe - Fe₃C:
"Formas Alotrópicas"

FERRITA

AUSTENITA



Sistema Fe - Fe₃C:
Cementita = Carbeta de Ferro "Fe₃C"

- Forma-se quando o limite de solubilidade do carbono é ultrapassado (6,7% de C)
- É dura e frágil
- É um composto intermetálico metaestável, embora a velocidade de decomposição em ferro α e C seja muito lenta
- A adição de Si acelera a decomposição da cementita para formar grafita

Pontos Importantes do Sistema
Fe-Fe₃C (Eutético)

LIGA EUTÉTICA

Líquido \rightleftharpoons Fase g (austenita) + Fe₃C (cementita)

- Temperatura = 1147 °C
- Teor de Carbono = 4,3 %

- Ligas de Ferro fundido de 2,06-4,3 % de C são chamadas de ligas **hipoeutéticas**
- Ligas de Ferro fundido acima de 4,3 % de C são chamadas de ligas **hipereutéticas**

Pontos Importantes do Sistema
Fe-Fe₃C (Eutetóide)

LIGA EUTETÓIDE

Austenita \rightleftharpoons fase α (ferrita) + Fe₃C (cementita)

- Temperatura = 723 °C
- Teor de Carbono = 0,8 %
- Aços com 0,002 - 0,8 % de C são chamadas de **aços hipoeutetóide**
- Aços com 0,8 - 2,06 % de C são chamadas de **aços hipereutetóides**

Microestruturas
/ Eutetóide

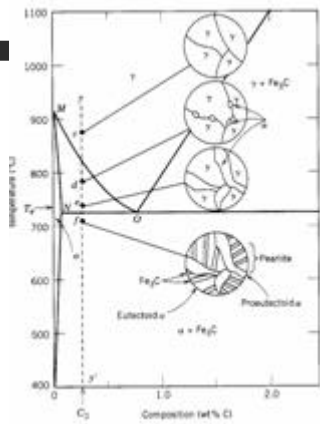
Supondo resfriamento lento para manter o equilíbrio

PERLITA: Consiste de lamelas alternadas de fase " α " (ferrita) e Fe₃C (cementita)

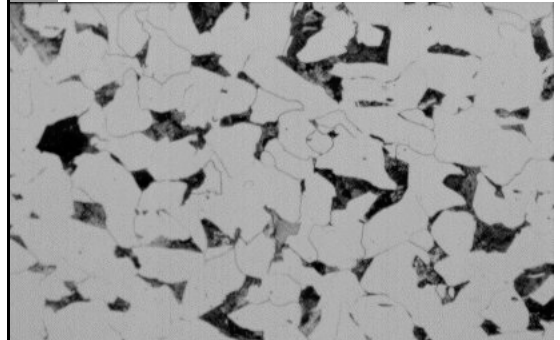
FERRITA: lamelas mais espessas e claras
CEMENTITA: lamelas mais finas e escuras

- Propriedades mecânicas da perlita: intermediária entre a ferrita (macia e dúctil) e cementita (dura e frágil)

Estruturas apresentadas durante o resfriamento de uma liga ferro-carbono hipoeutetóide

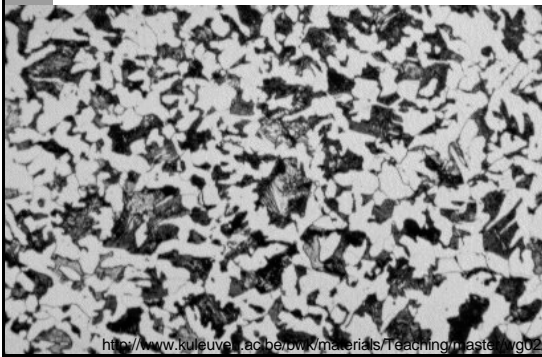


Microestrutura de um aço com 0,2 % de carbono laminado a quente mostrando ferrita (branco) e colônias de perlita (preto) (x 200)



<http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/Teaching/master/wg02/0100.htm>

Microestrutura de um aço com 0,36 % de carbono laminado a quente mostrando ferrita (branco) e colônias de perlita (preto) (x 500)



<http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/Teaching/master/wg02/0100.htm>

Microestruturas / Hipoeutetóide

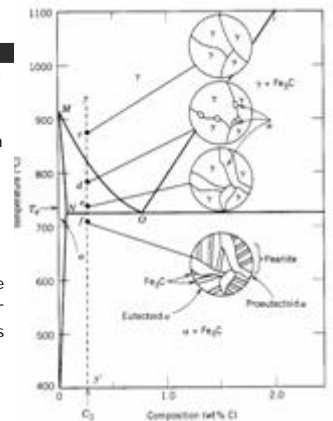
“Supondo resfriamento lento para manter o equilíbrio”

• Teor de Carbono: de 0,002% a 0,8%

• Estrutura: Ferrita + Perlita

• As quantidades de ferrita e perlita variam conforme a % de carbono, podendo ser determinadas pela regra das alavancas.

• Partes claras: α - Próeutetóide



Microestruturas / Hiper-eutetóide

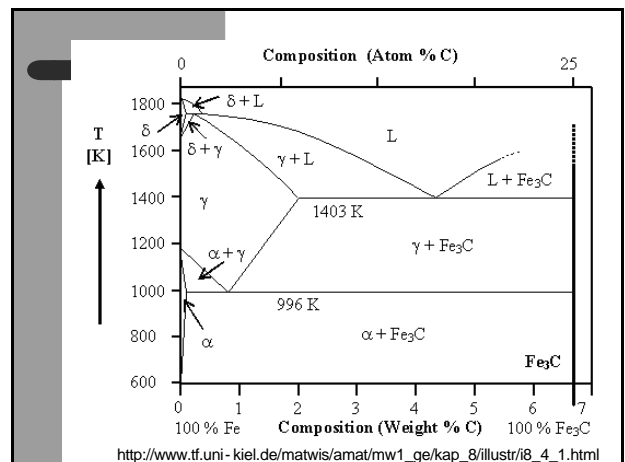
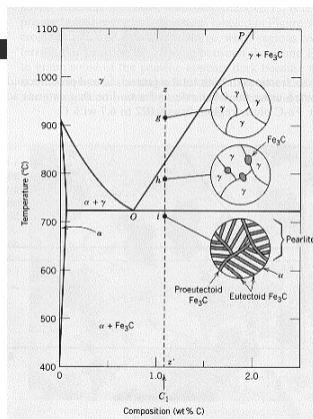
“Supondo resfriamento lento para manter o equilíbrio”

• Teor de Carbono: 0,8% a 2,06 %

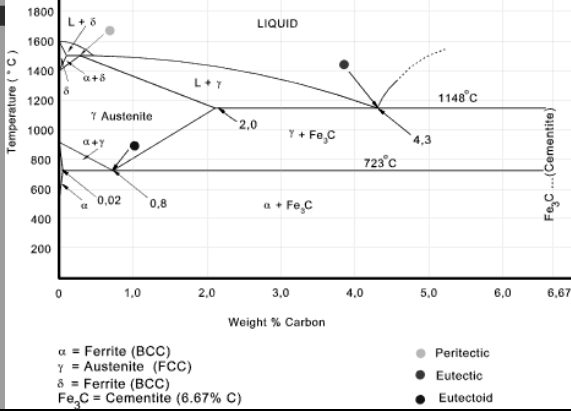
• Estrutura: cementita + Perlita

• As quantidades de cementita e perlita variam conforme a % de carbono, podendo ser determinadas pela regra das alavancas.

• Partes claras: cementita próeutetóide



http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_8/illustr/i8_4_1.html



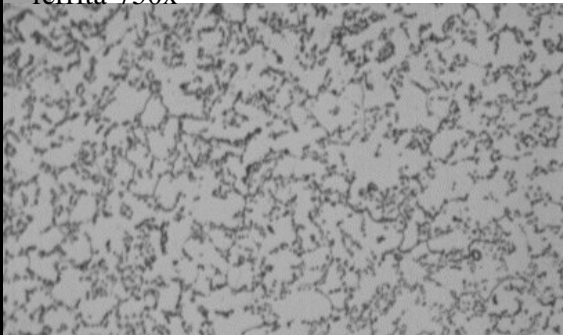
Se for aquecer a microestrutura cementita e ferrita, será que se conseguiria alguma modificação na microestrutura?

Sim?

Não?

De que tipo?

laminada a quente 0,36 % de carbono mostrando perlita esferoidizada em matriz ferrita 750x

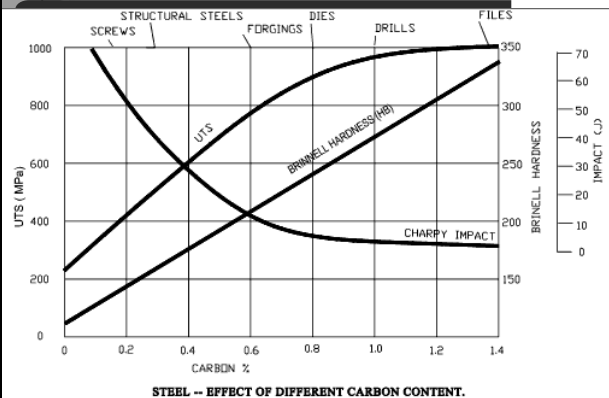


Exercício

- Nas ligas ferro carbono, como o aumento do teor de carbono influencia na dureza, resistência e ductilidade da liga?

Situação problema

- Descrever um componente mecânico complexo, todas as suas solicitações, características e propriedades e selecionar um metal ferroso para este componente.
- Descrever para a turma o componente e o material.



Bibliografia

- Aços e ferro fundido. Ed. ABM. Chiaverini, V.
- Princípio da ciência dos materiais – Van Vlack, Laurence H. Ed. Edgar Blucher
- Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos, Ed. Edgard Blucher, Sérgio Augusto de Souza, 1982.
- JÚNIOR, W. D. Callister, Materials Science and Engineering an Introductio Fourth Edition, United States, 1997.
- Eleani Maria da Costa – DEM/PUCRS – transparências internet
- http://www.chemistrycoach.com/Phase_diagram.htm
- <http://www.metaltch.com.br>
- <http://www.benbest.com/cryonics/lessons.html>
- <http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/Teaching/master/wg02/10100.htm>
- http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_8/illustr/i8_4_1.html
- http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Matter/Phase_diagram.html

Como são classificados os aços?

ABNT

- 2 primeiros dígitos → elementos de liga principais

2 últimos dígitos → Teor de carbono multiplicado por 100

Exemplo: 1020 aço comum com 0,2 % de carbono

Exercício

- Determine os principais elementos de liga e o teor de carbono dos seguintes aços:
- 1020
- 1320
- 4340
- 8640

temos uma tabela de classificação dos aços na apostila

| SAE/ABNT | Descrição ou principais elementos de liga |
|-------------|---|
| 10XX | Aços-carbono de uso geral |
| 15XX | Manganês (1,75 %) |
| 150x | Manganês (1,00%) |
| 152x | Níquel (3,50%) |
| 154x | Níquel (5,00%) |
| 156x | Níquel (1,25%), cromo (0,65%) |
| 158x | Níquel (3,50%), cromo (1,55%) |
| 162x | Molibdênio (0,25%) |
| 41xx | Cromo (0,50 ou 0,95%), molibdênio (0,12 ou 0,20%) |
| 43XX | Níquel (1,80 %), cromo (0,50 ou 0,80 %), molibdênio (0,25 %) |
| 44xx | Níquel (1,55 ou 1,80%), molibdênio (0,20 ou 0,25%) |
| 47xx | Níquel (1,05%), cromo (0,45%), molibdênio (0,25%) |
| 48xx | Níquel (3,50%), molibdênio (0,25%) |
| 50xx | Cromo (0,28% ou 0,40%) |
| 51xx | Cromo (0,80, 0,90, 0,95, 1,00 ou 1,05%) |
| 61xx | Cromo (0,80 ou 0,95%), vanádio (0,10 ou 0,15%) |
| 86XX | Níquel (0,55 %), cromo (0,50 ou 0,65 %), molibdênio (0,20 %) |
| 87xx | Níquel (0,55%), cromo (0,50%), molibdênio (0,25%) |
| 92xx | Manganês (0,85%), silício (2,00%) |
| 93xx | Níquel (3,25%), cromo (1,20%), molibdênio (0,12%) |
| 94xx | Manganês (1,00%), níquel (0,45%), cromo (0,40%), molibdênio (0,12%) |
| 97xx | Níquel (0,55%), cromo (0,17%), molibdênio (0,20%) |
| 98xx | Níquel (1,00%), cromo (0,80%), molibdênio (0,25%) |

Classificação dos aços

Classificação geral das ligas ferro-carbono

Aços

- Aço carbono
 - 0,008 a 2,11 %C
- Aço liga
 - Elementos de liga

Ferro fundido

- Branco
 - Baixo Si
 - Rico em Fe₃C
- Cinzento
 - Alto Si
 - Grafita livre
- Maleável
 - Branco trat. Termicamente
 - Grafita Nodular
- Nodular
 - Cinzento
 - Grafita esférica a partir do banho líquido

Ferro Fundido

Grafita Carbono puro

cementita Fe₃C

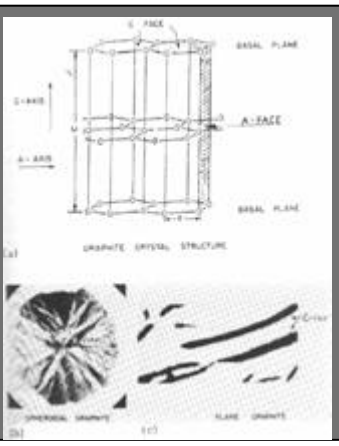
ferro fundido cinzento, teor de carbono acima de 2,1%

- Fratura cinzenta
- Grão fino
- Forma da grafita classifica
- Esferoidal – apresenta alta fluidez e usinabilidade
- Fratura branca a cinzentada
- Grão grosseiro
- Difícil usinagem
- Boa resistência a abrasão

Grafita

Só carbono

Qual a diferença entre a grafita do ferro fundido e o grafite do lápis?



Aço

- Cor acinzentada
- Densidade de 7,8 g/cm³
- Temperatura de fusão 1250 – 1450 C
- Ductilidade, tenacidade, elasticidade, resistência mecânica, resiliência
- Soldabilidade, temperabilidade, usinabilidade e forjabilidade.

carbono

Elementos de liga

- **Alumínio (Al):** é usado em pequenas proporções, como desoxidante e agente de controle do crescimento dos grãos.
- **Chumbo (Pb):** não se liga ao aço mas, quando adicionado, se distribui na estrutura em forma de partículas microscópicas, o que resulta em maior facilidade de usinagem. Entretanto, devido ao baixo ponto de fusão (cerca de 327°C), aços com chumbo não devem ser usados em temperaturas acima de 250°C.
- **Cobalto (Co):** aumenta a dureza do aço sob altas temperaturas.
- **Cobre (Cu):** melhora a resistência à corrosão por agentes atmosféricos, se usado em teores de 0,2 a 0,5%.

Elementos de liga

- **Cromo (Cr):** melhora a resistência à corrosão (aço com cerca de 12 % Cr resiste à ação da água e de vários ácidos), aumenta a resistência à tração (em média, 80 MPa para cada 1 % de cromo), melhora a facilidade de tempera, aumenta a resistência à alta temperatura e ao desgaste.
- **Enxofre (S):** é, na maioria dos casos, um elemento indesejável, oriundo do processo de produção. Se combinado com o ferro na forma de sulfeto, deixa o aço quebradiço. Entretanto, se combinado com o manganês no forma do respectivo sulfeto, favorece a usinagem com a formação de cavacos que se quebram facilmente.
- **Fósforo (P):** é considerado um elemento prejudicial, resultante do processo de produção. Torna o aço frágil, efeito que se acentua com o aumento do teor de carbono. Assim, os teores máximos permitidos devem ser controlados com rigor em aços para aplicações estruturais ou críticas.

Elementos de liga

- **Manganês (Mn):** em média, para cada 1% de manganês, a resistência à tração aumenta 100 MPa. Para aços temperáveis, aumenta a dureza após o processo de tempera.
- **Molibdênio (Mo):** melhora a resistência a altas temperaturas, a resistência ao desgaste e a dureza após a tempera. Para aços inoxidáveis, melhora a resistência à corrosão.
- **Silício (Si):** é um agente desoxidante na produção do aço. Aumenta a resistência à corrosão e a resistência à tração mas prejudica a soldagem. O silício aumenta significativamente a resistividade elétrica do aço e, por isso, aços com silício são amplamente usados em núcleos magnéticos (motores, transformadores, etc) devido às menores perdas com as correntes parasitas que se formam.

Elementos de liga

- **Níquel (Ni):** em média, para cada 1 % de níquel, a resistência à tração aumenta 40 MPa mas o limite de elasticidade é mais favorecido. Melhora significativamente a capacidade de tempera, possibilitando redução da velocidade de resfriamento.
- O níquel altera a alotropia do ferro e teores acima de 25 % fazem reter a austenita em temperaturas usuais, fazendo um **aço austenítico** que também é não magnético e bastante resistente à corrosão. Com 36 % de Ni, o aço tem o menor coeficiente de dilatação térmica e é usado em instrumentos de medição. Em conjunto com o cromo, o aço pode ser austenítico com a combinação 18 % Cr e 8 % Ni.

Tungstênio (W): aumenta a resistência à tração em altas temperaturas. Forma carbeto bastante duro e é usado em aços para ferramentas (aços rápidos).

Vanádio (V): refina a estrutura do aço, impedindo o crescimento dos grãos. Forma carbeto duro e estável e é usado em aços para ferramentas para aumentar a capacidade de corte e dureza em altas temperaturas.

Aços

Influência dos elementos de liga

Responda

Que elemento de liga aumenta a resistência a corrosão?

Que elemento de liga aumenta a dureza a quente?

Que elemento de liga aumenta a temperabilidade?

Que elemento de liga aumenta a formação de carbeto?

Classificação dos aços

Quanto a composição química

- ABNT
- Os dois primeiros dígitos indicam os elementos de liga
- Os dois últimos dígitos indicam o teor de carbono multiplicado por 100.

Relembrando

Ex: ABNT 1020: aço ao carbono com 0,2 %C

Classificação dos aços

Quanto a aplicação

- Usinagem fácil – S, Mn, Pb
 - ABNT 1111 e 1212
 - Aço para cementação – baixo teor de carbono
 - ABNT 1020, 8620
 - Aço para beneficiamento - têmpera e revenido pequenas dimensões, alta resistência
 - ABNT 4340 e 8640
 - Aço mola - alto limite de elasticidade e a fadiga
 - ABNT 9260 e 5160
 - Aço ferramenta – alta dureza e resistência ao desgaste
 - ABNT O1 e A2
- Aços para fins magnéticos
 - Aços resistentes ao calor

Classificação dos aços

Aços para corrosão – aços inoxidáveis

>12 % Cr

- Aços inoxidáveis ferríticos
 - Não endurecível por têmpera
 - AISI 430
- Aços inoxidáveis martensíticos
 - AISI 410 e 420
 - endurecível por têmpera
- Aços inoxidáveis austeníticos
 - Paramagnético
 - Não endurecível por têmpera
 - AISI 302, 303, 304 316L

Aços inoxidáveis

Influência dos elementos de liga

- Cromo – película de óxido protetora, por ser contínua, impermeável e resistente.
- Níquel – austenizante, resistência ao calor e a corrosão
- Molibdênio – 2 a 4 % resistência ao calor e corrosão.
- Titânio, nióbio e tântalo formam carbeto, assim sequestram o carbono, estabilizando o cromo na matriz.
- Enxofre e selênio – melhoram a usinabilidade

Desafio de materiais

- Descrever o motivo pelo qual são selecionados os materiais para o projeto de um motor a combustão interna.

Bibliografia

- Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos, Ed. Edgard Blucher, Sérgio Augusto de Souza, 1982.
- JÚNIOR, W. D. Callister. Materials Science and Engineering an Introduction. Fourth Edition. United States, 1997.
- **Eleani Maria da Costa – DEM/PUCRS – transparências internet**
 - <http://myspace.eng.br/>
 - <http://www.arcelor.com/br/cst>
 - <http://www.gerdau.com.br/>

Pergunta-se

- Por que devemos estudar os defeitos cristalinos?
- Qual a importância dos defeitos cristalinos para as propriedades dos materiais?
- O que são propriedades dos materiais? Por que precisamos conhecê-las?

A estrutura cristalina influencia diretamente sobre as propriedades mecânicas de um material

Propriedades Mecânicas

- Ductilidade
- Dureza
- Elasticidade
- Resistência a tração

Propriedades térmicas

- Condutibilidade térmica
- Expansão térmica

Propriedades físicas (outras)

- Transparência
- Densidade

Propriedades elétricas

- Condutibilidade elétrica
- Resistência ao arco

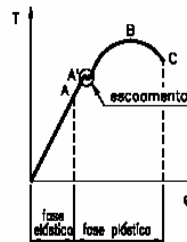
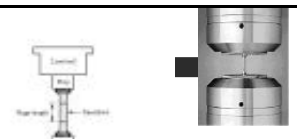
Propriedades Mecânicas

Definem o comportamento do material quando sujeito a esforços mecânicos

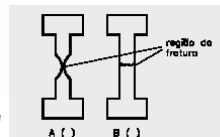
Resistência mecânica – conjunto de propriedades – podem ser tirados de um mesmo ensaio (ensaio de tração)

- Resistência a tração
- Resistência a fratura
- Ductilidade
- Tenacidade
- Resiliência
- Dureza

Resistência à tração



- A - limite elástico
- A' - limite de proporcionalidade
- B - limite de resistência
- C - limite de ruptura



Propriedades químicas

- Resistência à corrosão
- Será que temos que cuidar se o material da extrusora vai apresentar deterioração por ação química ou eletroquímica com o ambiente?
- Será que todas as peças correm o mesmo risco de degradação?
- Por que algumas peças das extrusoras antigas apresentam *ferrugeme* outras não?

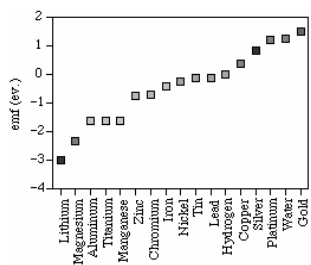
Plano de aula

ITM_propriedadequimica

Atividade prática aqui na sala temática-

ITM_3c_Plano_de_aula_propriedadequimica.doc

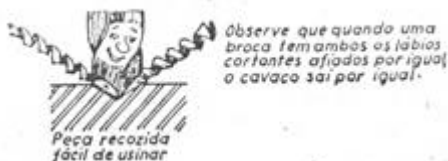
POTÊNCIA PADRÃO DOS METAIS EM RELAÇÃO AO PADRÃO DE HIDROGÊNIO



Propriedades tecnológicas

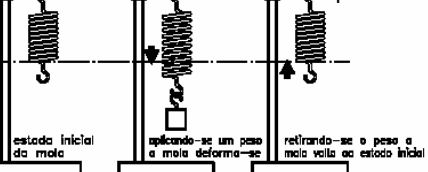
- Usinabilidade
 - O que é usinagem?
 - O que significa ter usinabilidade?
 - Será que é dependente da estrutura ou da composição química?
- Conformabilidade
- Temperabilidade
- Soldabilidade
- Sinterabilidade

USINABILIDADE



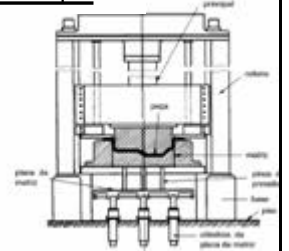
Propriedades mecânicas

■ Elasticidade
■ Plasticidade



Propriedades dos materiais

- Química, Mecânicas
- Tecnológicas



Trabalhabilidade de uma liga ferrosa

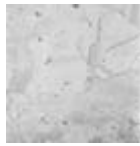
- aquecimento →



recuperação



recristalização

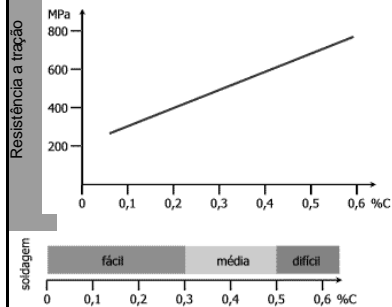


Crescimento do grão

O carbono no aço

- O carbono no aço forma uma solução sólida
- O carbono com o ferro forma a cementita, um carbeto de ferro Fe_3C
- Como o teor de carbono influencia as propriedades do material?

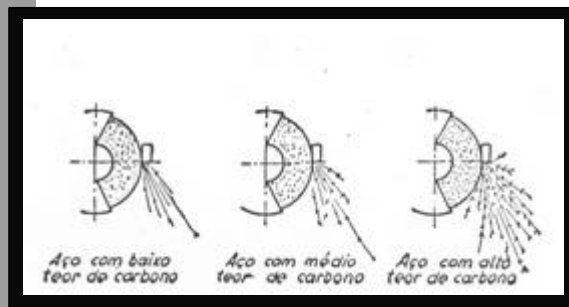
Varição das propriedades com o teor de carbono



Aumentando o teor de carbono aumenta a dureza, a resistência, diminui a soldabilidade

http://myspace.eng.br/eng/mat/aco3.asp#ef_carb

Indicação do teor de carbono no esmeril



Pergunta-se

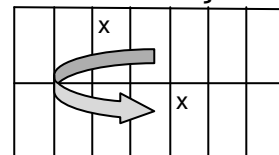
- Como usar um aço muito duro de difícil usinabilidade?
- Podemos aplicar que tipo de tratamento térmico para amolecer este material? Que tipo de propriedade estamos mudando durante este tratamento térmico?
- Será que este aço pode voltar as características originais? Que propriedade podemos mudar nele?

Situação problema

Uma forma nova de avaliação

Para a próxima aula/semana

Tragam material de consulta: Livros, revistas e apostilas.



Estudar?!!!

BIBLIOGRAFIA:

- Aços e ferro fundido. Ed. ABM. Chiaverini, V.
- Princípio da ciência dos materiais – Van Vlack, Laurence H. Ed. Edgar Blucher
- Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos, Ed. Edgar Blucher, Sérgio Augusto de Souza, 1982.
- JUNIOR, W. D. Callister. Materials Science and Engineering an Introduction.
- Fourth Edition. United States, 1997.
- Eleani Maria da Costa – DEM/PUCRS – transparências internet

16
5

Pro In I rama tensão deformação



Competência:

Compreender a propriedade mecânica resisêntcia à tração

Habilidade:

Realizar um ensaio de tração

Selecionar parâmetros para um ensaio de tração

16
4

PROPRIEDADES MECÂNICAS

POR QUÊ ESTUDAR?

- A determinação e/ou conhecimento das propriedades mecânicas é muito importante para a escolha do material para uma determinada aplicação, bem como para o projeto e fabricação do componente.

16
5

PROPRIEDADES MECÂNICAS

- As propriedades mecânicas definem o comportamento do material quando sujeito à esforços mecânicos,
- Estão relacionadas à capacidade do material de resistir ou transmitir estes esforços aplicados sem romper e sem se deformar de forma incontrolável.

16
6

Principais propriedades mecânicas

- Resistência à tração
- Elasticidade
- Ductilidade
- Fluência
- Fadiga
- Dureza
- Tenacidade,....

Cada uma dessas propriedades está associada à habilidade do material de resistir às forças mecânicas e/ou de transmiti-las

16
7

TIPOS DE TENSÕES QUE UMA ESTRUTURA ESTA SUJEITA

- Tração
- Compressão
- Cisalhamento
- Torção

16
8

Como determinar as propriedades mecânicas?

- A determinação das propriedades mecânicas é feita através de ensaios mecânicos.
- Utiliza-se normalmente corpos de prova (amostra representativa do material) para o ensaio mecânico, já que por razões técnicas e econômicas nem sempre é praticável realizar o ensaio na própria peça, que seria o ideal.
- Geralmente, usa-se normas técnicas para o procedimento das medidas e confecção do corpo de prova para garantir que os resultados sejam comparáveis.

16
9

NORMAS TÉCNICAS

As normas técnicas mais utilizadas na mecânica são elaboradas pelas:

- ASTM (American Society for Testing and Materials)
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)

Por que se utilizam normas técnicas para a realização dos ensaios mecânicos e tantos outros? Qual a necessidade desta padronização?

17
0

TESTES MAIS COMUNS PARA SE DETERMINAR AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS

- Resistência à tração
(+ comum, determina a elongação)
- Resistência à compressão
- Resistência à torção
- Resistência ao choque
- Resistência ao desgaste
- Resistência à fadiga
- Dureza
- Etc...

17
1

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO



É medida submetendo-se o material à uma carga ou força de tração, paulatinamente crescente, que promove uma deformação progressiva de aumento de comprimento

17
2



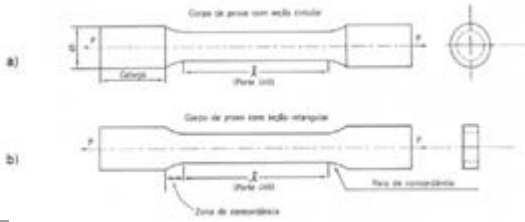
ESQUEMA DE MÁQUINA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

PARTES BÁSICAS

- Sistema de aplicação de carga
- dispositivo para prender o corpo de prova
- Sensores que permitam medir a tensão aplicada e a deformação promovida (extensômetro)

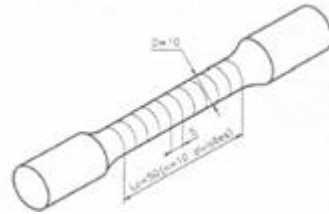
17
4

Corpos padronizados



17
5

Marcação do corpo de prova



17
6

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

TENSAO (σ) X Deformação (ϵ)

$$\sigma = F/A_0 \Rightarrow \text{Kgf/cm}^2 \text{ ou Kgf/mm}^2 \text{ ou N/mm}^2$$

Força ou carga

Área inicial da seção reta transversal

17
7

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

TENSAO (σ) X Deformação (ϵ)

Como efeito da aplicação de uma tensão tem-se a deformação (variação dimensional).

A deformação pode ser expressa:

$$\text{Deformação} = l - l_0 / l_0 = \Delta l / l_0$$

- O número de centímetros de deformação por centímetro de comprimento
- O comprimento deformado como uma porcentagem do comprimento original

l_0 = comprimento inicial
 l_f = comprimento final

17
8

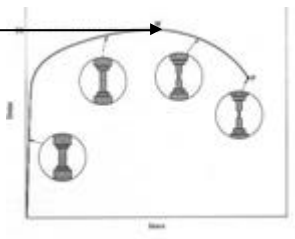
Comportamento dos metais quando submetidos a tração

TENSAO (σ) X DEFORMAÇÃO (ϵ)

Resistência à tração

Dentro de certos limites, a deformação é proporcional à tensão (a lei de Hooke é obedecida)

$$\text{Lei de Hooke: } S = E \cdot e$$



17
9

A deformação pode ser:

- Elástica
- Plástica

Deformação
Volta
Não volta

18
0

Deformação Elástica e Plástica

DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

- Prescede à deformação plástica
- É reversível
- Desaparece quando a tensão é removida
- É praticamente proporcional à tensão aplicada (obedece a lei de Hooke)

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

- É provocada por tensões que ultrapassam o limite de elasticidade
- É irreversível porque é resultado do deslocamento permanente dos átomos e portanto não desaparece quando a tensão é removida

Elástica



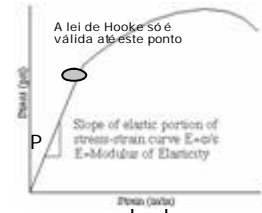
Plástica

Informações que podem ser obtidas das curvas tensão x deformação

Módulo de elasticidade ou Módulo de Young:

$$E = \frac{s}{e} = N/mm^2$$

- É o quociente entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante.
- Está relacionado com a rigidez do material ou à resist. à deformação elástica
- Está relacionado diretamente com as forças das ligações interatômicas



Módulo de Elasticidade para alguns metais

Quanto maior o módulo Young mais rígido é o material ou menor é a sua deformação elástica quando aplicada uma dada tensão

Considerações gerais sobre módulo de elasticidade

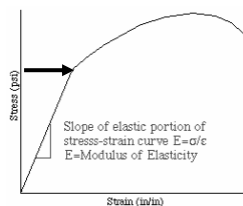
Como consequência do módulo de elasticidade estar diretamente relacionado com as forças interatômicas:

- Os materiais cerâmicos tem alto módulo de elasticidade, enquanto os materiais poliméricos tem baixo
- Com o aumento da temperatura o módulo de elasticidade diminui

* Considerando o mesmo material sendo este monocristalino, o módulo de elasticidade depende apenas da orientação cristalina

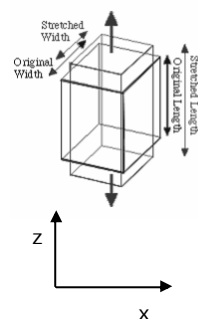
LIMITE DE ELASTICIDADE

- Corresponde à máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformação permanente



O COEFICIENTE DE POISSON PARA ELONGAÇÃO OU COMPRESSÃO

- Qualquer elongação ou compressão de uma estrutura cristalina em uma direção, causada por uma força uniaxial, produz um ajustamento nas dimensões perpendiculares à direção da força



ϵ_z Longitudinal Strain
 ϵ_x Lateral Strain
 Poisson Ratio
 $\nu = -\epsilon_x / \epsilon_z$
 Values of ν :
 No volume change = 0.5
 Typical Polymer = 0.4
 Typical Metal = 0.3
 Typical Ceramic = 0.2

Forças de compressão, cisalhamento e torção

- O comportamento elástico também é observado quando forças compressivas, tensões de cisalhamento ou de torção são impostas ao material

18
7

O FENÔMENO DE ESCOAMENTO

- Esse fenômeno é nitidamente observado em alguns metais de natureza dúctil, como aços baixo teor de carbono.
- Caracteriza-se por um grande alongamento sem acréscimo de carga.

18
8

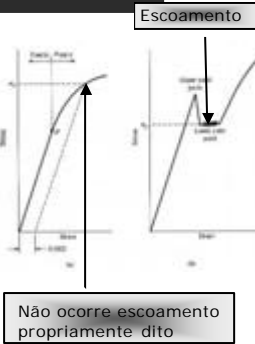
Outras informações que podem ser obtidas das curvas tensão x deformação

Tensão de escoamento

σ_y = tensão de escoamento (dá a capacidade de um material resistir à deformação plástica)

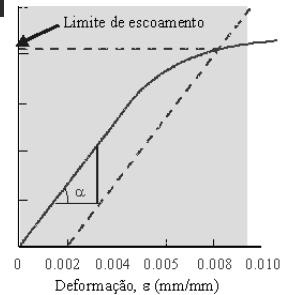
• De acordo com a curva "a", onde não observa-se nitidamente o fenômeno de escoamento

• Alguns aços e outros materiais exibem o comportamento da curva "b", ou seja, o limite de escoamento é bem definido (o material escoar-se plasticamente sem praticamente aumento da tensão). Neste caso, geralmente a tensão de escoamento corresponde à tensão máxima verificada durante a fase de escoamento



Limite de Escoamento

onde não observa-se nitidamente o fenômeno de escoamento, a tensão de escoamento corresponde à tensão necessária para promover uma deformação permanente de 0,2% ou outro valor especificado (obtido pelo método gráfico indicado na fig. Ao lado)



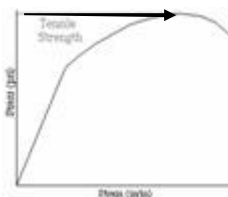
Fonte figura: Prof. Sidnei Paciornik do Departamento de Ciência dos Materiais 19 Metalurgia da PUC-Rio

0

Outras informações que podem ser obtidas das curvas tensão x deformação

Resistência à Tração (Kgf/mm^2)

- Corresponde à tensão máxima aplicada ao material antes da ruptura
- É calculada dividindo-se a carga máxima suportada pelo material pela área de seção reta inicial

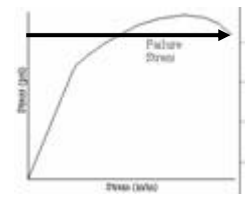


19
1

Outras informações que podem ser obtidas das curvas tensão x deformação

Tensão de Ruptura (N/mm^2)

- Corresponde à tensão que promove a ruptura do material
- O limite de ruptura é geralmente inferior ao limite de resistência em virtude de que a área da seção reta para um material dúctil reduz-se antes da ruptura



19
2

Outras informações que podem ser obtidas das curvas tensão-deformação

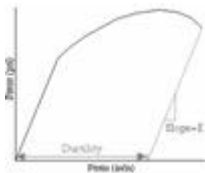
Ductilidade

- Corresponde à elongação total do material **devido à deformação plástica**

- %elongação=

$$\frac{(l_f - l_0)}{l_0} \times 100$$

Onde l_f corresponde ao comprimento final após a ruptura

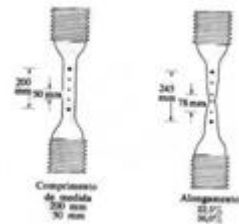


Ductilidade expressa como alongamento

- %elongação=

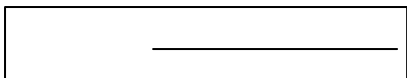
$$\frac{(l_f - l_0)}{l_0} \times 100$$

- Como a deformação final é localizada, o valor da elongação só tem significado se indicado o comprimento de medida



Ductilidade expressa como estricção

- Corresponde à redução na área da seção reta do corpo, imediatamente antes da ruptura
- Os materiais dúcteis sofrem grande redução na área da seção reta antes da ruptura
- Estricção= $\frac{\text{área inicial} - \text{área final}}{\text{área inicial}}$



Outras informações que podem ser obtidas das curvas tensão-deformação

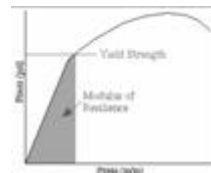
Resiliência

- Corresponde à capacidade do material de absorver energia quando este é deformado elasticamente

- A propriedade associada é dada pelo módulo de resiliência (U_r)

$$U_r = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

- Materiais resilientes são aqueles que têm alto limite de elasticidade e baixo módulo de elasticidade (como os materiais utilizados para molas)



Outras informações que podem ser obtidas das curvas tensão-deformação

Tenacidade

- Corresponde à capacidade do material de absorver energia até sua ruptura



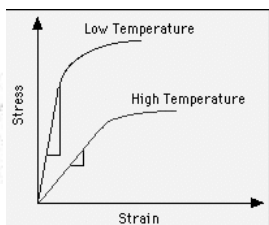
Algumas propriedades mecânicas para alguns metais

| Metal Alloy | Yield Strength MPa (ksi) | Tensile Strength MPa (ksi) | Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)] |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Aluminum | 35 (5) | 90 (13) | 40 |
| Copper | 69 (10) | 200 (29) | 45 |
| Brass (70Cu-30Zn) | 75 (11) | 300 (44) | 68 |
| Iron | 130 (19) | 262 (38) | 45 |
| Nickel | 138 (20) | 480 (70) | 40 |
| Steel (1020) | 180 (26) | 380 (55) | 25 |
| Titanium | 450 (65) | 520 (75) | 25 |
| Molybdenum | 565 (82) | 655 (95) | 35 |

VARIACÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS COM A TEMPERATURA

Fluência

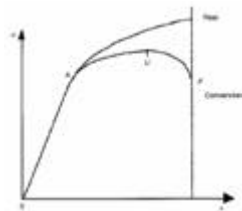
- Elastic Modulus \Rightarrow Increase Decrease
 Tensile Strength \Rightarrow Increase Decrease
 Yield Strength \Rightarrow Increase Decrease
 Ductility \Rightarrow Increase Decrease



19
9

TENSÃO E DEFORMAÇÃO VERDADEIRAS

- A curva de tensão x deformação convencional, estudada anteriormente, não apresenta uma informação real das características tensão e deformação porque se baseia somente nas características dimensionais originais do corpo de prova ou amostra e que na verdade são continuamente alteradas durante o ensaio.



20
0

TENSÃO E DEFORMAÇÃO VERDADEIRAS

TENSÃO REAL (σ_r)

$$\sigma_r = F/A_i$$

onde A_i é a área da seção transversal instantânea (m^2)

DEFORMAÇÃO REAL (ϵ_r)

- $d \epsilon_r = dl/l$
- $\epsilon_r = \ln li/lo$

Se não há variação de volume $A_i \cdot l_i = A_o \cdot l_o$

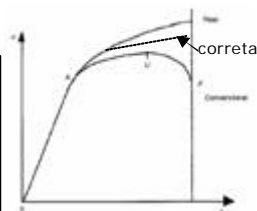
$$\epsilon_r = \ln A_i/A_o$$

20
1

TENSÃO CORRETA PARA A REGIÃO ONDE INICIA-SE A FORMAÇÃO DO PESCOÇO

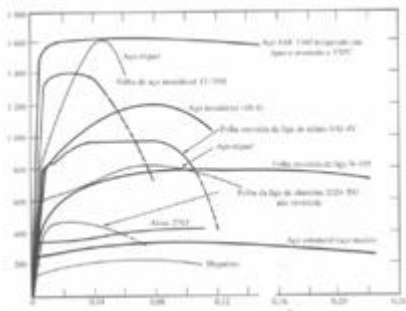
$$\sigma_r = k \epsilon^n$$

- k e n são constantes que dependem do material e dependem do tratamento dado ao material, ou seja, se foram tratados termicamente ou encruados



20
2

Curva tensão deformação para diferentes metais



20
3

Exercício

- Desenhe um diagrama tensão deformação:
- Determine seus pontos principais.
- Descreva as propriedades medidas diretamente do diagrama tensão deformação:
- Que outras propriedades mecânicas podemos determinar com o uso do diagrama tensão-deformação? Justifique sua resposta

20
4

Outras propriedades mecânicas importantes

- Resistência ao impacto
- Dureza
- Fluência
- Fratura
- Fadiga

20
5

Bibliografia

- Ensaios dos materiais, A. Garcia, J.A. Spim e C.A. Santos, Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2000.
- Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos, Ed. Edgard Blucher, Sérgio Augusto de Souza, 1982.
- JÚNIOR, W. D. Callister. Materials Science and Engineering an Introduction. Fourth Edition. United States, 1997.
- *Eleani Maria da Costa – DEM/PUCRS – transparências internet*

20
6

FALHA OU RUPTURA NOS METAIS

Fluência
Fadiga
Fratura

20
7

Compreender a diferença entre fratura dúctil e fratura frágil

- A engenharia e ciência dos materiais tem papel importante na prevenção e análise de falhas em peças ou componentes mecânicos.



20
8

FRATURA

- Consiste na separação do material em 2 ou mais partes devido à aplicação de uma carga estática à temperaturas relativamente baixas em relação ao ponto de fusão do material

20
9

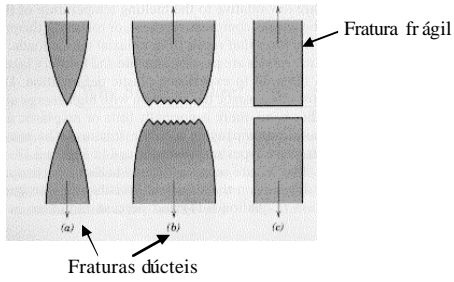
FRATURA

- **Dúctil** → a deformação plástica continua até uma redução na área para posterior ruptura (É OBSERVADA EM MATERIAIS CFC)
- **Frágil** → não ocorre deformação plástica, requerendo menos energia que a fratura dúctil que consome energia para o movimento de discordâncias e imperfeições no material (É OBSERVADA EM MATERIAIS CCC E HC)

O tipo de fratura que ocorre em um dado material depende da temperatura

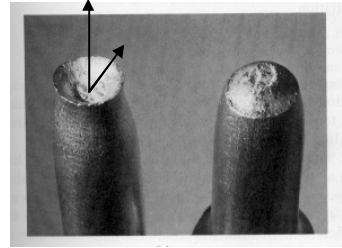
21
0

FRATURA



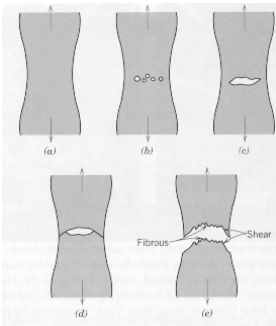
21
1

MACROSCÓPICO



21
2

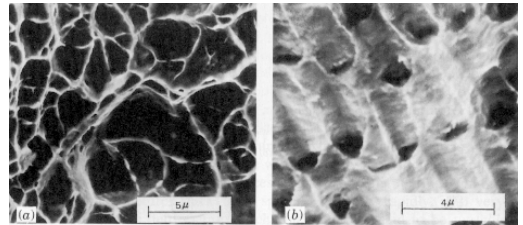
MECANISMO DA FRATURA DÚCTIL



- a- formação do pescoço
- b- formação de cavidades
- c- coalescimento das cavidades para promover uma trinca ou fissura
- d- formação e propagação da trinca em um ângulo de **45 graus em relação à tensão aplicada**
- e- rompimento do material por propagação da trinca

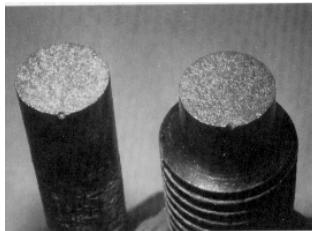
21
3

MICROSCÓPICO



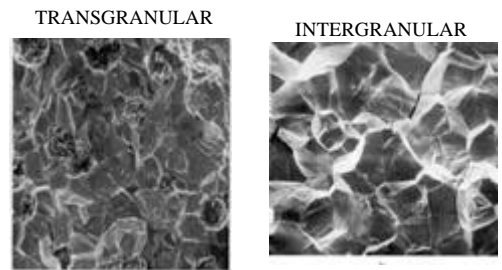
21
4

ASPECTO MACROSCÓPICO



21
5

E INTERGRANULAR



21
6

FLUÊNCIA (*CREEP*)

- Quando um metal é solicitado por uma carga, imediatamente sofre uma deformação elástica. Com a aplicação de uma carga constante, a deformação plástica progride lentamente com o tempo (fluência) até haver um estrangulamento e ruptura do material
- Velocidade de fluência (relação entre deformação plástica e tempo) aumenta com a temperatura
- Esta propriedade é de grande importância especialmente na escolha de materiais para operar a altas temperaturas

21
7

FLUÊNCIA (*CREEP*)

- Então, fluência é definida como a deformação permanente, dependente do tempo e da temperatura, quando o material é submetido à uma carga constante
- Este fator muitas vezes limita o tempo de vida de um determinado componente ou estrutura
- Este fenômeno é observado em todos os materiais, e torna-se importante à altas temperaturas (0,4Tf)

21
8

FLUÊNCIA (*CREEP*)

FATORES QUE AFETAM A FLUÊNCIA

- Temperatura
- Módulo de young - elasticidade
- Tamanho de grão

Em geral:

Quanto maior o ponto de fusão, maior o módulo de young e maior é a resistência à fluência.

Quanto maior o o tamanho de grão maior é a resist. à fluência.

21
9

PERGUNTAS

- Por quê um tamanho de grão grande favorece uma maior resistência à fluência?

22
0

ENSAIO DE FLUÊNCIA

- Bibliografia: V. Chiaverini, Tecnologia Mecânica, Vol. 1
- Ler mais sobre fluência no Van Vlack pg 152

22
1

FADIGA

- É a forma de falha ou ruptura que ocorre nas estruturas sujeitas à forças dinâmicas e cíclicas
- Nessas situações o material rompe com tensões muito inferiores à correspondente à resistência à tração (determinada para cargas estáticas)
- É comum ocorrer em estruturas como pontes, aviões, componentes de máquinas
- A falha por fadiga é geralmente de natureza frágil mesmo em materiais dúcteis

22
2

FADIGA

- A fratura ou rompimento do material por fadiga geralmente ocorre com a formação e propagação de uma trinca.
- A trinca inicia-se em pontos onde há imperfeição estrutural ou de composição e/ou de alta concentração de tensões (que ocorre geralmente na superfície)
- A superfície da fratura é geralmente perpendicular à direção da tensão à qual o material foi submetido

22
3

FADIGA

- Os esforços alternados que podem levar à fadiga podem ser:
- Tração
- Tração e compressão
- Flexão
- Torção,...

22
4

LIMITE DE FADIGA

■ *Eleani Maria da Costa – DEM/PUCRS – transparências internet*

Bibliografia: V. Chiaverini, Tecnologia Mecânica, Vol. 1

Van Vlack pg 157

22
5

Eixo temático

Introdução a materiais

Projeto Integrador I

DUREZA

Competência:
Compreender a propriedade mecânica dureza
Habilidade:
Fazer medidas de dureza.
Selecionar ensaio de dureza

Dureza

É uma propriedade mecânica relacionada à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente.

Dureza

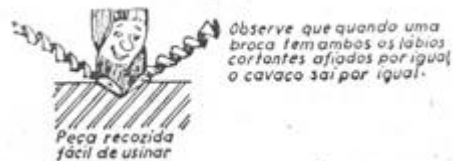
- A dureza depende diretamente das forças de ligação entre os átomos, íons ou moléculas e do estado do material (processo de fabricação, tratamento térmico, etc.)

Pergunte-se

Se a dureza do material depende da ligação química...

...Materiais cerâmicos são por princípio de maior ou menor dureza que os materiais poliméricos??

DUREZA EMPÍRICA



MEDIDA DA DUREZA

Maneira

rápida,
barata e

não destrutiva

de avaliar a resistência mecânica de um material

O ENSAIO DE DUREZA

Existem 2 formas de ensaios:

Estáticos

Dinâmicos

Ensaio dinâmico

Dureza ao risco

- Dureza Mohs (mais antiga)
- Esclerometria (ui!!!)

Dureza Mohs

- O mais duro risca o mais macio

| Grau de dureza (crecente) | Nome do mineral | Fórmula |
|---------------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | Talco | $Mg_3H_4Si_2O_{10}$ |
| 2 | Gipsita | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ |
| 3 | Calcita | $CaCO_3$ |
| 4 | Fluorita | CaF_2 |
| 5 | Apatita | $Ca_5(PO_4)_3$ |
| 6 | Órtose (Feldspato) | $KAlSi_3O_8$ |
| 7 | Quartzo | SiO_2 |
| 8 | Topazio | $Al_2F_2SiO_6$ |
| 9 | Corindum ou Alumina | Al_2O_3 |
| 10 | Diamante | C |

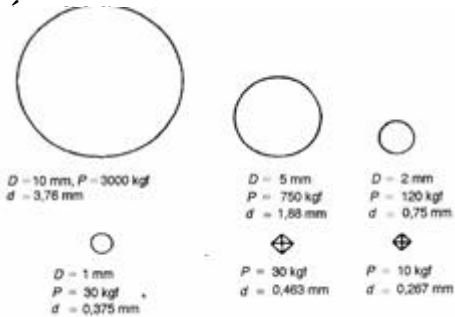
Ensaio Estáticos

- A maioria dos ensaios de dureza estáticos consistem na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça, pela aplicação de pressão, com uma ponta de penetração.
- A medida da dureza do material é dada em função das características da marca de impressão e da carga aplicada

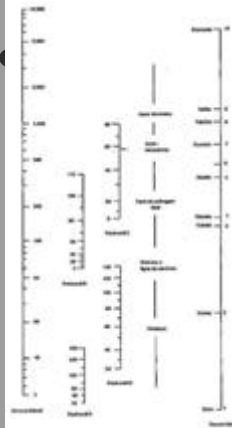
PRINCIPAIS ENSAIOS DE DUREZA ESTÁTICOS

- Ensaio de dureza Brinell
- Ensaio de dureza Rockwell
- Ensaio de dureza e microdureza Vickers e Knoop

CARACTERÍSTICAS DOS PENETRADORES USADOS EM DIFERENTES ENSAIOS DE DUREZA ES



ESCALAS DE DUREZA



DUREZA BRINELL (1900)

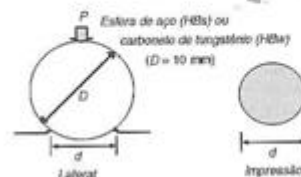
- Foi o primeiro ensaio de dureza por penetração padronizado e reconhecido industrialmente

Dureza = carga de impressão (N ou Kgf) = $\frac{P}{S}$
área da calota impressa (mm²)

Dureza Brinell

BRINELL (HB)

$$HB = 0,102 \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \cdot P(N)$$



Dureza Brinell

- Há tabelas que fornecem o valor da dureza Brinell a partir dos diâmetros da impressão em função da carga utilizada e do diâmetro da esfera
- Quanto maior o diâmetro da calota impressa mais mole é o material

O USO DE QUALQUER CARGA E QUALQUER DIÂMETRO DE ESFERA NÃO PRODUZEM NUM MESMO MATERIAL VALORES IDÊNTICOS DE DUREZA

- Portanto, deve-se escolher cargas (P) e diâmetros de esferas (D) em que:

$$P/D^2 = \text{constante (K)}$$
$$0,3D < d < 0,6D$$

ESCOLHA DO TIPO DE ESFERA (AÇO OU CARBETO DE TUNGSTÊNIO)

- Depende da faixa de dureza do material
- Esfera de aço para dureza < 430 HB

ESCOLHA DO DIÂMETRO DA ESFERA E DA CARGA

- Depende da faixa de dureza do material, dimensões da peça, etc.
- No entanto quanto maior a esfera, maior é a área abrangida na medida de dureza, ou seja, mais representativo é seu valor, que é importante principalmente para materiais com microestrutura heterogênea.

Vamos pensar?

Homogêneo x Heterogêneo

- Responda em seu caderno
- Se misturamos leite no café, esta mistura é homogênea ou heterogênea?
- Se misturamos arroz com feijão, esta mistura é homogênea ou heterogênea?

Vamos pensar?

Homogêneo x Heterogêneo

- Sabemos que a ferrita e a austenita são soluções de ferro e carbono.
- Quando medimos seu tamanho de grão percebemos que estas fases são homogêneas ou heterogêneas?
- Sabemos que a perlita é na verdade uma mistura de duas fases cementita e ferrita.
- Quando medimos a quantidade de cementita e de ferrita percebemos que a perlita é homogênea ou heterogênea?

Voltemos para a Dureza Brinell

- LIMITE DE ESPESSURA
- $e \geq 2d$
- LIMITE DE RAIOS DE CURVATURA
- $r \geq 5D$
- Valores de dureza em função da relação P/D^2

Valores de dureza em função da relação P/D^2

| P/D^2 | Dureza (Kg/mm ²) | Dureza (N/mm ²) | Materiais ensaiados |
|---------|------------------------------|-----------------------------|---|
| 30 | 90-415 | 900- 4150 | Aços e ferros fundidos |
| 10 | 30-140 | 300-1400 | Cobre, alumínio e suas ligas mais duras |
| 5 | 15-70 | 150-700 | Ligas anti-fricção, cobre, alumínio e suas ligas mais moles |
| 2,5 | Até 30 | Até 300 | Chumbo, estanho, antimônio e metais patentes |

Valores de P/D^2 e de diâmetros de esfera recomendados no ensaio de dureza brinell

| Diâmetro da Esfera D em mm | $P= 30D^2$ Kgf | $P= 10D^2$ Kgf | $P= 5D^2$ Kgf | $P= 2,5D^2$ Kgf |
|----------------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 10 | 3000 | 1000 | 500 | 250 |
| 5 | 750 | 250 | 125 | 62,5 |
| 2,5 | 187,5 | 62,5 | 31,2 | 15,6 |

RECOMENDAÇÃO

- Sempre que possível utilizar o maior valor para a relação P/D^2 e a esfera de maior diâmetro

LIMITAÇÃO DO MÉTODO BRINELL

- Não pode ser utilizado para peças muito finas e não é aplicável em materiais muito duros, como aço duro temperado, metal duro e outros de dureza idêntica ou superior às esferas penetradoras.

CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

$$s = a \cdot HB$$

ESTA RELAÇÃO NÃO DEVE SER APLICADA PARA DUREZAS MAIORES QUE 380 HB
(a partir desse valor a dureza aumenta muito mais que a resistência)

Valores de α

Tabela 4.1 Valores experimentais de α para alguns materiais. [Adaptado de Callister, 1994.]

| Material | α |
|----------------------------------|----------|
| Aço-carbono | 3,60 |
| Aço-carbono tratado termicamente | 3,40 |
| Aços-liga tratados termicamente | 3,30 |
| Latão encruado | 3,45 |
| Cobre recozido | 5,20 |
| Alumínio e suas ligas | 4,00 |

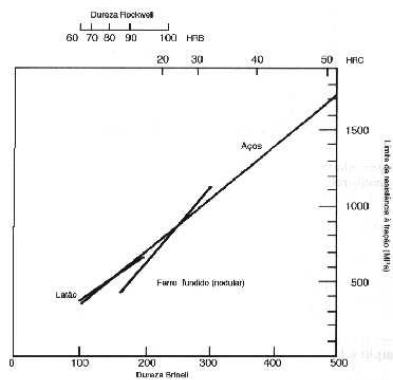
A dureza do aço

Tabela 4.2 Relação entre microconstituintes e dureza Brinell para aços-carbono.

| Microconstituintes | Dureza Brinell — HB |
|--------------------|---------------------|
| Ferrita | 80 |
| Perlita grosseira | 240 |
| Perlita fina | 380 |
| Martensita | 595 |

↑
Martensita e temperabilidade

Correlação de dureza e limite de resistência à tração



Exercícios sobre dureza Brinell

- Por que deve se tomar cuidado com a relação diâmetro da esfera usada e carga aplicada?

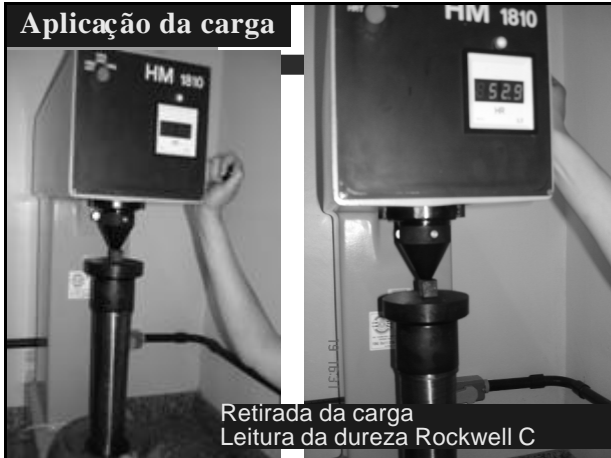
DUREZA ROCKWELL (HR) - 1922

É a mais utilizada internacionalmente
Norma Brasileira + usada: NBR-6671
Norma americana + usada: ASTM E18-94

Vantagens do ROCKWELL em relação ao BRINELL

- Rapidez de execução
- Maior exatidão e isenção de erros pessoais uma vez que a leitura é feita diretamente no aparelho
- Possibilidade de maior utilização em metais duros
- Pequeno tamanho da impressão (pode ser ensaiada em peças prontas)

Aplicação da carga



Retirada da carga
Leitura da dureza Rockwell C

Princípio do método

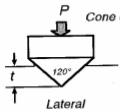
- Força-se, pela aplicação de uma carga pré-estabelecida, um penetrador de forma e dimensões conhecidas sobre a superfície da peça a ensaiar.

Tipos de penetradores para Rockwell

ROCKWELL (HR)

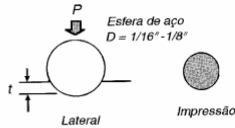
Rockwell (A, C, D)

P (60 kgf, 150 kgf, 100 kgf)



Rockwell (B, F, G)

P (100 kgf, 60 kgf, 150 kgf)

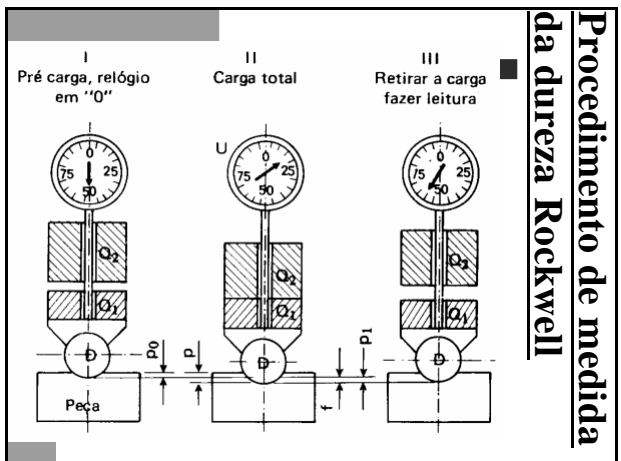


Tipos de Dureza Rockwell

- Dependendo do penetrador e das pré-cargas e cargas aplicadas a dureza Rockwell pode ser classificada em:
 - Rockwell comum
 - Rockwell superficial

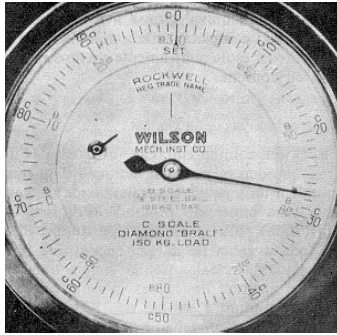
PRÉ-CARGA CARGA Rockwell

| Rockwell Comum | Rockwell Superficial |
|----------------|----------------------|
| 100 N | 30 N |
| 600 N | 150 N |
| 1000 N | 300 N |
| 1500 N | 450 N |



Procedimento de medida da dureza Rockwell

Procedimento de medida da dureza Rockwell



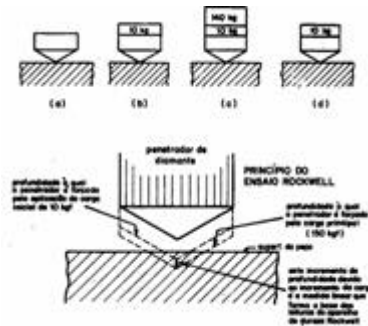
Etapas

- A → o penetrador é colocado em contato com a superfície da carga;
- B → aplica-se uma carga inicial de 10kgf; **100 N**
- C → aplica-se uma carga maior conforme a escala adotada. A carga é mantida até o ponteiro do mostrador da máquina parar;
- D → a carga é removida permitindo a recuperação elástica do material, sendo mantida a carga inicial de 10 Kgf.

O valor da Dureza Rockwell

- É um nº arbitrário proporcional à profundidade de penetração.
- O número de dureza é sempre citado com o símbolo HR seguido da escala utilizada (Ex: 68 HRC).

O valor da Dureza Rockwell



DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO (em mm)

Penetrador de diamante

| | |
|-------------|------------------------------|
| comum | $p = (100 - HR) \cdot 0,002$ |
| superficial | $p = (100 - HR) \cdot 0,001$ |

Penetrador esférico:

| | |
|-------------|------------------------------|
| comum | $p = (130 - HR) \cdot 0,002$ |
| superficial | $p = (100 - HR) \cdot 0,001$ |

A pré-carga

Função

- Eliminar a ação de eventuais defeitos superficiais
- Causar uma pequena deformação permanente, eliminando os erros causados pela deformação elástica.

Tabela 4.3 Características das escalas de dureza Rockwell. [Adaptado de ASTM E18-94.]

| Escala | Penetrador | Carga (kgf) | Leitura na Escala | Aplicações Típicas |
|--------|------------------|-------------|-------------------|--|
| B | Esfera 1,58 mm | 100 | Vermelha | FoFo (ferro fundido), aços não-temperados |
| C | Diamante (cone) | 150 | Preta | Aço temperado ou cementado |
| A | Diamante (cone) | 60 | Preta | Metal duro, aço fundido 'temperado' rápido |
| D | Diamante (cone) | 100 | Preta | Aço fundido com espessura reduzida |
| E | Esfera 3,175 mm | 100 | Vermelha | FoFo, ligas de alumínio e magnésio, metal duro |
| F | Esfera 1,588 mm | 60 | Vermelha | Metais moles, ligas de cobre |
| G | Esfera 1,588 mm | 150 | Vermelha | Bronze, fósforo, ligas de berílio, Fofo maleável |
| H | Esfera 3,175 mm | 60 | Vermelha | Alumínio, zinco, chumbo, abrasivos |
| K | Esfera 3,175 mm | 150 | Vermelha | Metal duro e metais de baixa dureza |
| L | Esfera 6,350 mm | 60 | Vermelha | Mesma Rockwell K, borracha e plásticos |
| M | Esfera 6,350 mm | 100 | Vermelha | Mesma Rockwell K e L, madeira e plásticos |
| P | Esfera 6,350 mm | 150 | Vermelha | Mesma Rockwell K, L e M, plásticos |
| R | Esfera 12,700 mm | 60 | Vermelha | Mesma Rockwell K, L e M, plásticos |
| S | Esfera 12,700 mm | 100 | Vermelha | Mesma Rockwell K, L e M, plásticos |
| V | Esfera 12,700 mm | 150 | Vermelha | Mesma Rockwell K, L, M, P e R ou S |

Recomendações:

- Ao medir a dureza de um material desconhecido, deve-se primeiro tentar uma escala mais alta para evitar a danificação do penetrador.
- A primeira leitura do ensaio Rockwell deve-se ser desprezada, porque esta impressão serve para ajustar o penetrador na máquina.
- Se a superfície da amostra não for plana deve-se fazer uma correção no valor da dureza (existem tabelas para correção), porque a dureza Rockwell se baseia na profundidade e não na área.
- A espessura da amostra deve ser no mínimo 10X maior que a profundidade da impressão.
- As impressões devem ser espaçadas de no mínimo 3X o diâmetro da impressão.
- A distância da borda deve ser no mínimo 2X o diâmetro da impressão.

Curiosidade

Dureza média em Rockwell C de carbeto encontrados em materiais de ferramenta

- | | | |
|---|---|--------|
| • Matriz temperada de aço rápido | → | • 66,0 |
| • Carbeto de (Fe, W, Mo) ₆ C em aço rápido | → | • 75,2 |
| • Carbeto de Tungstênio WC | → | • 82,5 |
| • Carbeto de vanádio VC | → | • 84,5 |

Fonte: Fundamentos de usinagem de materiais – Dino Ferraresi - Editora Blücher Ltda

DUREZA VICKERS (HV) - 1925

Ensaio Vickers

DUREZA VICKERS

- Norma Brasileira + usada: NBR-6672
- É aplicada a um amplo espectro de materiais

Vantagens do ensaio Vickers

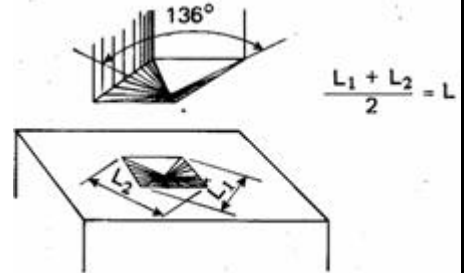
- É aplicável a todos os materiais metálicos com quaisquer durezas, especialmente para materiais muito duros ou muito moles, muito finos, pequenos e irregulares,
- É indicado para o levantamento de curvas de profundidade de tempera e cementação,
- A escala é contínua,
- As impressões são extremamente pequenas,
- A deformação do penetrador é nula,
- Oferece grande precisão de medidas.

Princípio do método

- Força-se, pela aplicação de uma carga pré-estabelecida, um penetrador de forma e dimensões conhecidas sobre a superfície da peça a ensaiar.
- Relaciona-se a carga aplicada com a área de impressão (como no Brinell)

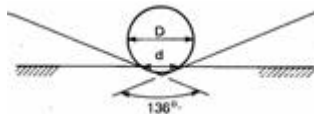
O penetrador para Vickers

- Pirâmide de diamante de base quadrada com um ângulo de 136° entre as faces opostas



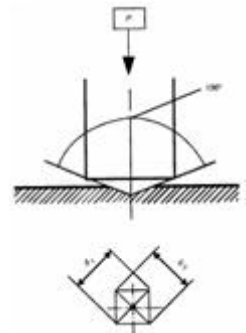
- *Este ângulo foi escolhido em função de sua proximidade com o ângulo formado no ensaio Brinell entre duas linhas tangentes às bordas de impressão e que partem do fundo desta impressão.*
- *A dureza Brinell e Vickers são próximas num intervalo grande de durezas*

Ângulo para a relação $d/D = 0,375$



Procedimento de medida da dureza Vickers

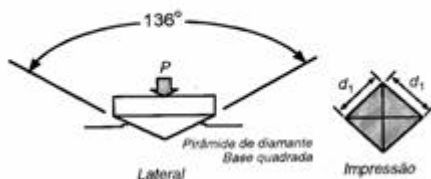
- A forma de impressão é a de um losango regular, cujas diagonais são medidas por um microscópio acoplado à máquina.



O valor da Dureza Vickers

- **Dureza: carga/área da superfície pirâmidal**

VICKERS (HV) $HV = 0,189 \cdot \left(\frac{P}{d^2} \right)$; P (N)



O valor da dureza é dado em HV ou em Kgf/mm² ou N/mm²

O valor da Dureza Vickers

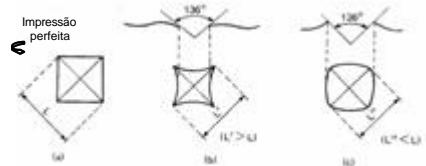
- *Na prática, o cálculo de HV é desnecessário, já que existem tabelas que fornecem o valor da dureza Vickers em função das diagonais da impressão formada e da carga utilizada.*

Cargas para Dureza Vickers

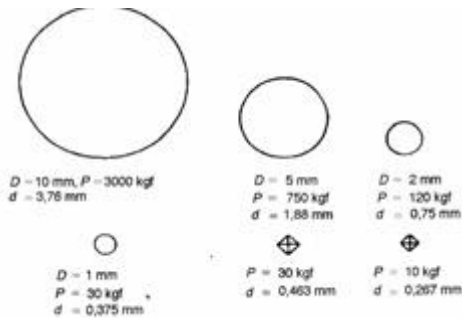
- Como o penetrador é indeformável, a dureza obtida independe da carga utilizada para materiais homogêneos.
- A mudança de carga muitas vezes é necessária para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões no visor da máquina (que depende da dureza do material).
- ENSAIO NORMAL: 50 -1200 N
- MICRODUREZA: < 10 N

Anomalias que podem ocorrer

- Materiais muito moles (recozidos) ocorre o a fundamento do metal em torno das faces do penetrador (b)
- Materiais muito duros (encruados) ocorre uma aderência do metal em torno das faces do penetrador (c)



Comparação entre tamanhos de impressão das durezas Brinell e Vickers



Relação entre dureza Vickers e limite de elasticidade (ou proporcionalidade)

- A dureza Vickers pode ser relacionada com o limite de elasticidade.

| Material | Dureza Vickers (HV) (MPa) | Limite de proporcionalidade (MPa) |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Diamante | 84.000 | 54.100 |
| Alumina | 20.000 | 11.300 |
| Carboneto de tungstênio | 21.000 | 7.000 |
| Berília | 13.000 | 7.000 |
| Aço | 2.100 | 700 |
| Cobre recozido | 470 | 150 |
| Alumínio recozido | 220 | 60 |
| Chumbo | 60 | 16 |

Considerações gerais sobre a dureza Vickers:

- Aplica-se a qualquer espessura da amostra, desde que não haja ocorrência de deformação no lado oposto (a espessura deve ser no mínimo 1,5 X a diagonal medida).
- Exige cuidadosa preparação da superfície da amostra quando deseja-se medir microdureza.
- É de utilização industrial limitada em função da demora do ensaio, porém de ampla utilização na pesquisa de materiais e processos.
- As impressões devem ser espaçadas de no mínimo 2,5 X a diagonal da impressão.

Exercício Dureza

- Você precisa determinar a dureza de um aço ABNT 1045 que foi temperado em água.
- a) Se você estivesse em uma oficina comum que técnicas usaria para verificar a tempera
- b) Se você estivesse agora como técnico num laboratório de materiais com todo tipo de equipamento, qual deles você usaria para verificar a tempera?

MICRODUREZA

- VICKERS
- KNOOP
- Emprega uma carga geralmente menor que 1 Kgf - 10 N (10 gf-1 kgf) com penetrador de diamante, produzindo um impressão microscópica.
- A superfície do corpo de prova deve ser plana e polida

APLICAÇÕES DA MICRODUREZA

- Levantamento de curvas de profundidade de tempera, cementação ou outro tratamento superficial
- Determinação da dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura
- Determinação da dureza de materiais frágeis
- Determinação da dureza de peças pequeníssimas e finas.

MICRODUREZA VICKERS

- Utiliza a mesma técnica descrita anteriormente.

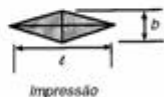
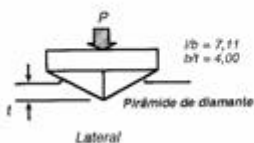
MICRODUREZA KNOOP

- Utiliza um penetrador de diamante na forma de uma pirâmide alongada.
- A relação de comprimento: largura: profundidade da impressão é de 30:4:1
- Relação entre diagonal e diagonal menor é de 7:1

MICRODUREZA KNOOP

Microdureza KNOOP (HK)

$$HK = 14,2 \cdot \left(\frac{P}{\ell^2} \right)$$



Microimpressões Vickers e knoop

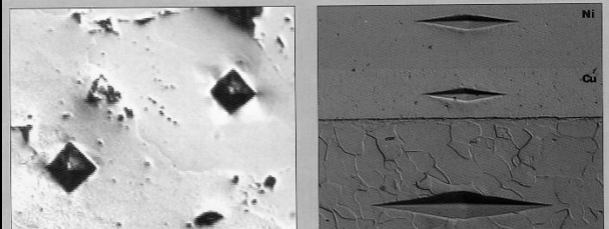
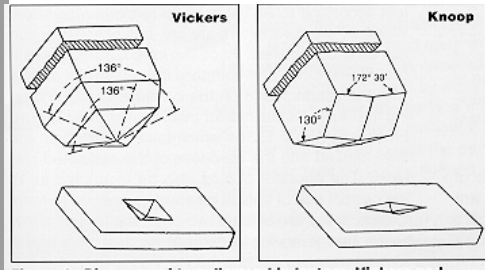


Figure 2 (left): Vickers microindentation hardness impressions in a copper infiltrated steel powder metallurgy specimen. DIC - 200x. Figure 3 (right): Knoop indentations positioned in nickel and copper coatings as well as the steel base material. While a 50g load provided properly sized (width vs. spacing) indents in the nickel and the steel, a 10g load produced an oversized indent (i.e., the spacing between the indent and the interface is <2.5 times the indent width) in the copper layer. 2% nitral etch, DIC - 250x.

Endentador Vickers e Knoop



Perfil de dureza



Figure 1: Knoop microindentation hardness impressions made across the case and core of a hardened steel specimen. 2% nital etch, DIC - 100x.

Observações Gerais

- Ao indicar o valor da microdureza, em Vickers ou Knoop, deve-se multiplicar o valor por 10^3 , para compará-lo com as grandezas das demais durezas que baseiam-se na relação carga/área (Kgf/mm^2), uma vez que na microdureza utiliza-se gf e a medida da diagonal em microns.
- A área obtida no ensaio Knoop é cerca de 15% da área correspondente no ensaio Vickers
- A profundidade de impressão obtida no ensaio Knoop é menor que a metade do correspondente no ensaio Vickers

Observações Gerais

- A diagonal da impressão obtida no ensaio Knoop é cerca de 3 X maior que a diagonal obtida no ensaio Vickers, sendo portanto mais precisa
- O ensaio Knoop permite a determinação da dureza de materiais frágeis como o vidro e de camadas finas como películas de tintas ou de camadas eletrodepositadas.
- Os ensaios de microdureza requerem uma preparação cuidadosa da amostra e é recomendável o polimento eletrolítico em vez de polimento mecânico, porque este último pode promover o encruamento da superfície.

Curiosidade

Dureza média em Knoop de carbets encontrados em materiais de ferramenta

| | | |
|--|---|--------|
| Aço ferramenta temperado em óleo (60,5 RC) | → | • 790 |
| Cementita (no aço ferramenta ao carbono) | → | • 1150 |
| Carbeto de cromo Cr_7C_3 no aço Tipo D | → | • 1820 |
| Óxido de alumínio em rebolos de retificação | → | • 2440 |
| Carbeto de Vanádio em aços alto V e C | → | • 2520 |

Exercício MicroDureza

- Quais as semelhanças e diferenças entre o ensaio Vickers e o Knoop?
- Explique com suas palavras por que no ensaio de dureza Rockwell e Brinell temos que ter cuidado na relação dureza do material do indentador e dureza do material da peça a medir e não precisamos ter este mesmo cuidado ao usar indutores Vickers e Knoop?

Introdução à tecnologia dos materiais
Prof. Suzy Pascoali

Tratamento térmico

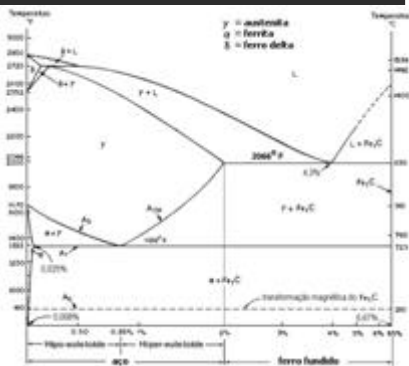
- Competência: Compreender tratamento térmico
- Habilidade: Selecionar e realizar tratamento térmico

30
2

BIBLIOGRAFIA:

- Ensaios dos materiais, A. Garcia, J.A. Spim e C.A. Santos, LTC, Rio de Janeiro, 2000.
- Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos, Ed. Edgard Blucher, Ségio Augusto de Souza, 1982.
- Fundamentos de usinagem de materiais – Dino Ferraresi - Editora Blücher Ltda.
- JÚNIOR, W. D. Callister. Materials Science and Engineering an Introduction.
- Fourth Edition. United States, 1997.
- **Eleani Maria da Costa – DEM/PUCRS – transparências internet**

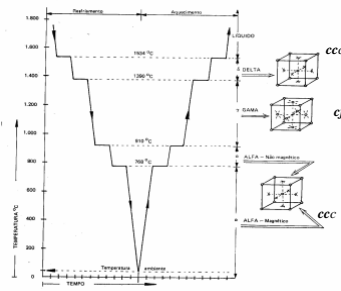
DIAGRAMA DE FASE Fe-Fe₃C



30
3

FERRO PURO

FERRO e carbono



- FERRO α = FERRITA
- FERRO γ = AUSTENITA
- FERRO δ = FERRITA δ
- TF= 1534 °C
- As fases α , γ e δ são soluções sólidas com Carbono intersticial

4

Ferro Puro /Formas Alotrópicas

FERRO α = FERRITA

- Estrutura= ccc
- Temperatura "existência"= até 912 °C
- Fase Magnética até 768 °C (temperatura de Curie)
- Solubilidade máx do Carbono= 0,002% a 727 °C
- É macio e dúctil

FERRO γ = AUSTENITA

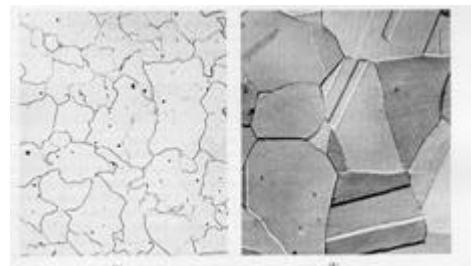
- Estrutura= fcc (tem + posições intersticiais)
- Temperatura "existência"= 912 -1394°C
- Fase Não-Magnética
- Solubilidade máx do Carbono= 2,14% a 1147 °C
- É mais dura

30
5

Ferro Puro /Formas Alotrópicas

FERRITA

AUSTENITA



30
6

Ferro Puro / Formas Alotrópicas

FERRO δ = FERRITA δ

- Estrutura= ccc
- Temperatura "existência"= acima de 1394°C
- Fase Não-Magnética
- É a mesma que a ferrita α
- Como é estável somente a altas temperaturas não tem interesse comercial

30
7

Sistema Fe-Fe₃C

- Ferro Puro= até 0,002% de Carbono
- Aço= 0,002 até 2,06% de Carbono
- Ferro Fundido= 2,1-4,5% de Carbono
- Fe₃C (CEMENTITA)= Forma-se quando o limite de solubilidade do carbono é ultrapassado (6,7% de C)

30
8

CEMENTITA (Fe₃C)

- Forma-se quando o limite de solubilidade do carbono é ultrapassado (6,7% de C)
- É dura e frágil
- é um composto intermetálico metaestável, embora a velocidade de decomposição em ferro α e C seja muito lenta
- A adição de Si acelera a decomposição da cementita para formar grafita

30
9

PONTOS IMPORTANTES DO SISTEMA Fe-Fe₃C (EUTÉTICO)

PONTO C \Rightarrow LIGA EUTÉTICA
é o ponto mais baixo de fusão

Líquido \Rightarrow FASE γ (austenita) + cementita

- Temperatura = 1147 °C

- Teor de Carbono = 4,3%

- As ligas de Ferro fundido de 2,06-4,3% de C são chamadas de ligas hipoeutéticas
- As ligas de Ferro fundido acima de 4,3% de C são chamadas de ligas hipereutéticas

31
0

PONTOS IMPORTANTES DO SISTEMA Fe-Fe₃C (EUTETÓIDE)

• PONTO S \Rightarrow LIGA EUTETÓIDE
 \Rightarrow é a liga de mais baixa temperatura de transformação sólida

Austenita \Rightarrow FASE α (FERRITA) + Cementita

- Temperatura= 723 °C

- Teor de Carbono= 0,8 %

- Aços com 0,002-0,8% de C são chamadas de aços hipoeutetóide
- Aços com 0,8-2,06% de C são chamadas de aços hipereutetóides

31
1

MICROESTRUTURAS / EUTETOIDE

Supondo resfriamento lento para manter o equilíbrio

- É similar ao eutético

Consiste de lamelas alternadas de fase α (ferrita) e Fe₃C (cementita) chamada de

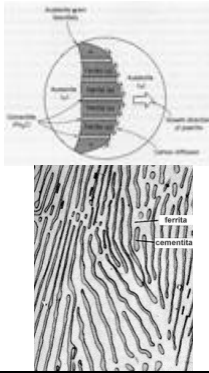
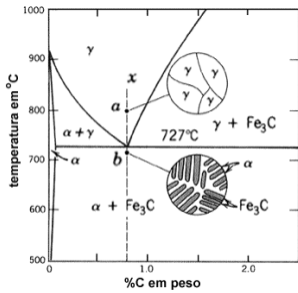
PERLITA

- FERRITA \Rightarrow lamelas + espessas e claras
- CEMENTITA \Rightarrow lamelas + finas e escuras
- Propriedades mecânicas da perlita

- intermediária entre ferrita (mole e dúctil) e cementita (dura e frágil)

31
2

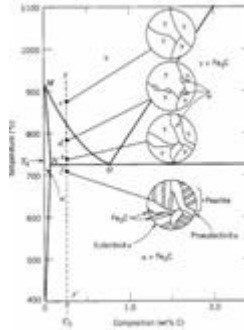
MICROESTRUTURAS / EUTETÓIDE



31
3

MICROESTRUTURAS / HIPOEUTETÓIDE

Supondo resfriamento lento para manter o equilíbrio



Teor de Carbono = 0,002- 0,8 %
Estrutura

Ferrita + Perlita

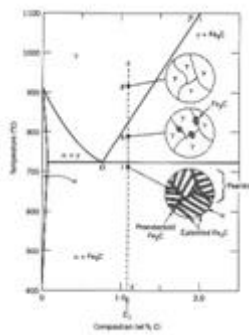
As quantidades de ferrita e perlita variam conforme a % de carbono e podem ser determinadas pela regra das alavancas

Partes claras → pró eutetóide ferrita

31
4

/HIPEKEUTETÓIDE

Supondo resfriamento lento para manter o equilíbrio



- Teor de Carbono = 0,8-2,06 %
- Estrutura
↪ cementita+ Perlita
- As quantidades de cementita e perlita variam conforme a % de carbono e podem ser determinadas pela regra das alavancas
- Partes claras → pró eutetóide cementita

31
5

Microestruturas

"Supondo resfriamento fora do equilíbrio"

EFEITOS DO NÃO-EQUILÍBRIO:

- Ocorrências de fases ou transformações em temperaturas diferentes daquela prevista no diagrama.
- Existência a temperatura ambiente de fases que não aparecem no diagrama.
- Cinética das transformações

31
6

Microestruturas: Martensita / Martensita revenida

MARTENSITA:

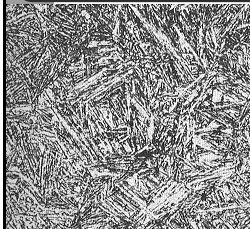
- É uma solução sólida supersaturada de carbono (não se forma por difusão)
- Forma de agulhas
- É dura e frágil
- Tem estrutura tetragonal cúbica (é uma fase metaestável, por isso não aparece no diagrama)

MARTENSITA REVENIDA:

- É obtida pelo reaquecimento da martensita (fase alfa + cementita)
- A dureza cai
- Os carbonetos precipitam
- Forma de agulhas escuras

31
7

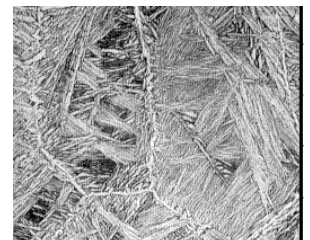
Martensita



Martensita no Aço

"A transformação Martensítica ocorre com o aumento de volume."

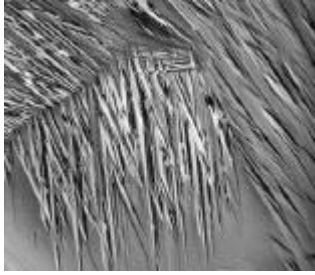
Martensita no Titânio



31
8

Martensita em Matriz de Austenita

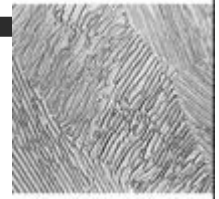
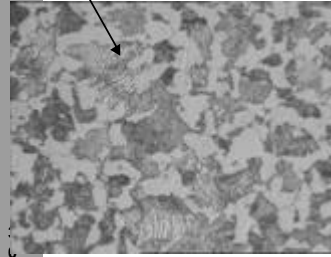
micrografia de uma liga de memória de forma (69%Cu-26%Zn-5%Al), mostrando as agulhas de martensita numa matriz de austenita



31
9

Perlita

Perlita



Microestruturas

BAINITA:

- Ocorre a uma temperatura inferior a do Joelho
 - Forma de agulhas que só podem ser vista com microscópio eletrónico
- Dureza:** bainita superior 40-45 Rc e bainita acicular 50-60 Rc

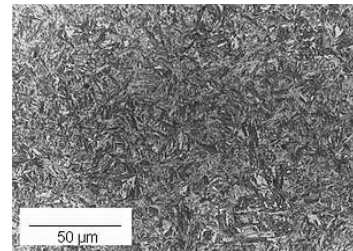
ESFEROIDITA:

- É obtida pelo reaquecimento (abaixo do eutetóide) da perlita ou bainita, durante um tempo bastante longo

32
1

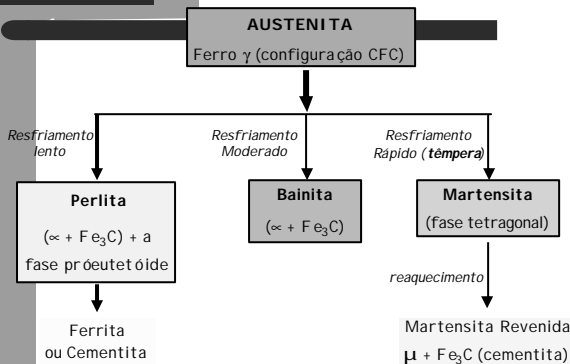
Microestruturas: Bainita

- Microestrutura da Bainita contendo finíssimas agulhas das fases



32
2

Transformações



32
3

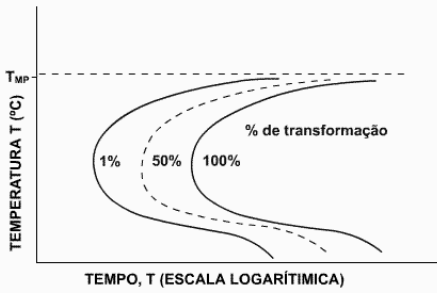
CURVAS TTT

- As curvas TTT estabelecem a temperatura e o tempo em que ocorre uma determinada transformação
- Só tem validade para transformações a temperatura constante

32
4

CURVAS TTT

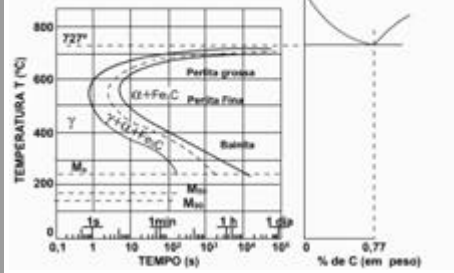
Diagrama de transformação tempo-temperatura para a reação de solidificação, ilustrando curvas com vários percentuais de finalização



32
5

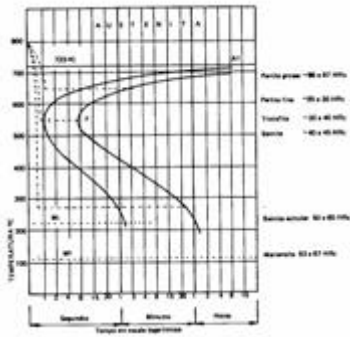
CURVAS TTT

Diagrama TTT mais completo para aço eutetóide. Os estágios da transformação martensítica são mostrados nas linhas horizontais. M_s representa o início, M₅₀ e M₉₀ 50 e 90 % da transformação, respectivamente.



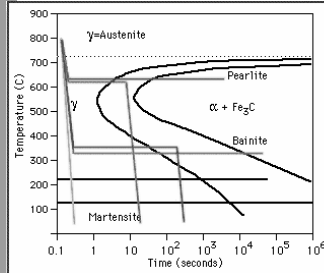
32
6

CURVAS TTT
MICROESTRUTURAS /EUTETÓIDE



32
7

TEMPERATURA CONSTANTE

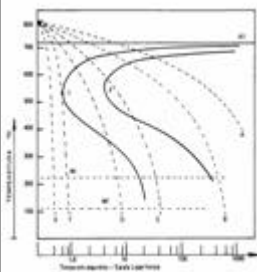


TTT (Time-Temperature-Transformation) Diagrams

- A: Pearlite
- B: Bainite
- C: Martensite
- D: Pearlite + Martensite
- E: Bainite + Martensite

32
8

CONTÍNUO
MICROESTRUTURAS /EUTETÓIDE

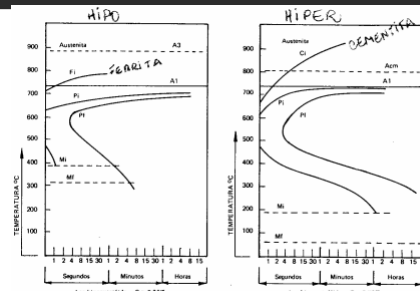


- A (FORNO)= Pearlita grossa
- B (AR)= Pearlita + fina (+ dura que a anterior)
- C (AR SOPRADO)= Pearlita + fina que a anterior
- D (ÓLEO)= Pearlita + martensita
- E (ÁGUA)= Martensita

No resfriamento contínuo, as curvas TTT deslocam-se um pouco para a direita e para baixo

32
9

CURVAS TTT
MICROESTRUTURAS /HIPOEUTETÓIDE E HIPEREUTETÓIDE



0,35% C

0,9% C

33
0

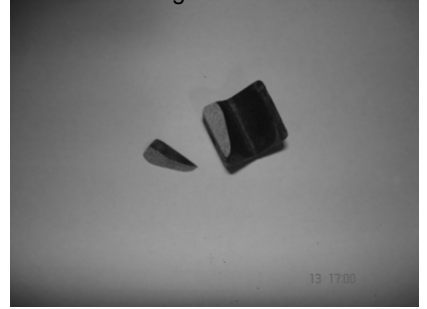
MICROESTRUTURAS

- **MARTENSITA**
 - É uma solução sólida supersaturada de carbono (não se forma por difusão)
 - Forma de agulhas
 - É dura e frágil (dureza: 63-67 Rc)
 - Tem estrutura tetragonal cúbica (é uma fase metaestável, por isso não aparece no diagrama)
- **MARTENSITA REVENIDA**
 - É obtida pelo reaquecimento da martensita (fase alfa + cementita)
 - A dureza cai
 - Os carbonetos precipitam
 - Forma de agulhas escuras finamente dispersas

33
1

Martensita não revenida

Um mordente temperado não foi revenido e na montagem sofreu fratura frágil



33
2

MARTENSITA (dureza: 63-67 Rc)



A transf. Martensítica ocorre c/ aumento de volume

33
3

MARTENSITA REVENIDA



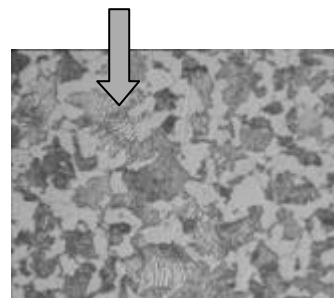
33
4

forma (69% Cu-26% Zn-5% Al), mostrando as agulhas de martensita numa matriz de austenita



33
5

PERLITA



*Perlita fina:
20-30 Rc
Perlita grossa:
86-97 RB*

33
6

MICROESTRUTURAS

• BAINITA

- Ocorre a uma temperatura inferior a do Joelho
- Forma de agulhas que só podem ser vista com microscópio eletrônico

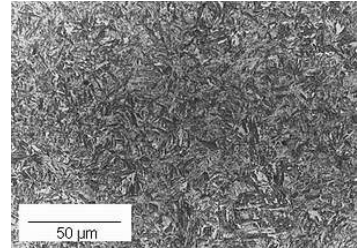
Dureza: bainita superior 40-45 Rc e bainita acicular 50-60 Rc

• ESFEROIDITA

- É obtida pelo reaquecimento (abaixo do eutetóide) da perlita ou bainita, durante um tempo bastante longo

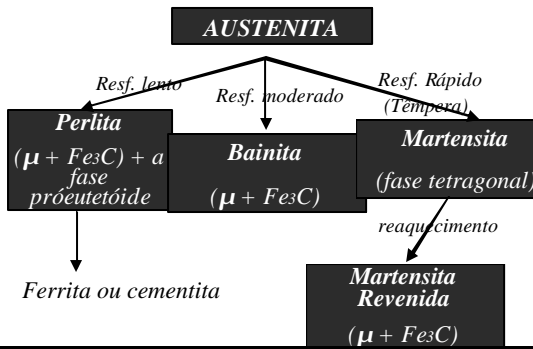
33
7

Microestrutura da Bainita contendo finíssimas agulhas das fases



33
8

TRANSFORMAÇÕES



33
9

FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT

- Teor de carbono
- Tamanho do grão da austenita
- Composição química (elementos de liga)

34
0

TEOR DE CARBONO

- Quanto menor o teor de carbono (abaixo do eutetóide) mais difícil de se obter estrutura martensítica

34
1

COMPOSIÇÃO QUÍMICA/ELEMENTOS DE LIGA

Quanto maior o teor e o número dos elementos de liga, mais numerosas e complexas são as reações



Todos os elementos de liga (exceto o Cobalto) deslocam as curvas para a direita, retardando as transformações



Facilitam a formação da martensita

*** Conseqüência: em determinados aços pode-se obter martensita mesmo com resfriamento lento

34
2

QUÍMICA/ELEMENTOS DE LIGA NAS CURVAS TTT

AISI 1335

AISI 5140

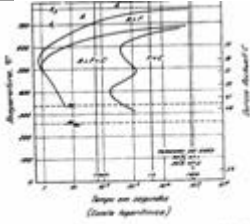


FIG. 25 — Curva TTT para aço AISI 1335 com 0,37% de carbono e 1,87% de mangâneso.

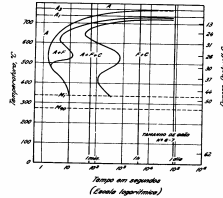


FIG. 27 — Curva TTT para aço AISI 5140 com 0,43% C, 0,68% Mn e 0,93% Cr.

34
3

Mesmo teor de carbono mas com diferentes elementos de liga

COMPOSIÇÃO QUÍMICA/ELEMENTOS DE LIGA

AISI 4340 → neste aço é possível obter bainita por resfriamento contínuo

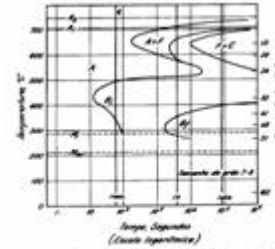


FIG. 28 — Curva TTT para aço AISI 4340 com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,78% Ni, 0,80% Cr e 0,31% Mo.

34
4

COMPOSIÇÃO QUÍMICA/ELEMENTOS DE LIGA

AISI 1321 cementado → as linhas Mi e Mf são abaixadas.

Neste aço a formação da martensita não se finaliza, levando a se ter austenita residual a temperatura ambiente.

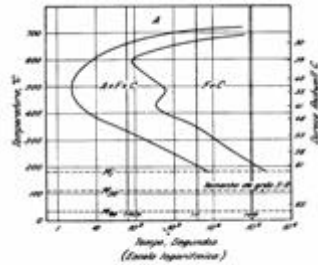


FIG. 29 — Curva TTT para aço 1321 cementado, com 0,80% C e 1,81% Mn.

34
5

TAMANHO DE GRÃO DA AUSTENITA

Quanto maior o tamanho de grão mais para a direita deslocam-se as curvas TTT



Tamanho de grão grande dificulta a formação da perlita, já que a mesma inicia-se no contorno de grão



Então, tamanho de grão grande favorece a formação da martensita

Como é que é?

34
6

TAMANHO DE GRÃO DA AUSTENITA

No entanto deve-se evitar tamanho de grão da austenita muito grande porque:

- Diminui a tenacidade
- Gera tensões residuais
- É mais fácil de empenar
- É mais fácil de ocorrer fissuras

34
7

HOMOGENEIDADE DA AUSTENITA

Quanto homogênea a austenita mais para a direita deslocam-se as curvas TTT



Os carbonetos residuais ou regiões ricas em C atuam como núcleos para a formação da perlita



Então, uma maior homogeneidade favorece a formação da martensita

34
8

MICROESTRUTURA

● Finalidade:

Alterar as microestruturas e como consequência as propriedades mecânicas das ligas metálicas

34
9

TRATAMENTOS TÉRMICOS

- Remoção de tensões internas
- Aumento ou diminuição da dureza
- Aumento da resistência mecânica
- Melhora da ductilidade
- Melhora da usinabilidade
- Melhora da resistência ao desgaste
- Melhora da resistência à corrosão
- Melhora da resistência ao calor
- Melhora das propriedades elétricas e magnéticas

35
0

TÉRMICOS DOS AÇOS

- Recozimento
- Normalização
- Têmpera e revenido
- Coalescimento ou esferoidização

35
1

RECOZIMENTO

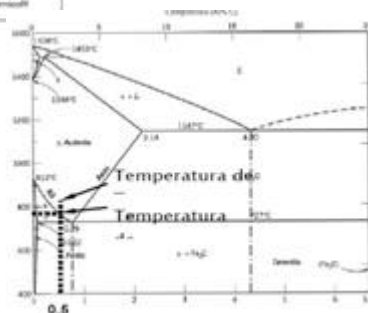
- Objetivos:
- Remoção de tensões internas devido aos tratamentos mecânicos
- Diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade
- Alterar as propriedades mecânicas como a resistência e ductilidade
- Ajustar o tamanho de grão
- Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas
- Produzir uma microestrutura definida

35
2

Recozimento plano

50% acima da temperatura de austenização para aços e ligas austeníticas

Entenda! Eu preciso saber a composição do aço para determinar a temperatura de Tratamento Térmico!



35
3

Recozimento para recristalização

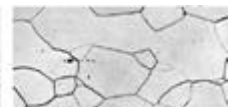
O mesmo anterior com a finalidade de eliminar os efeitos da deformação O encruamento

| Metal ou liga metálica | Temperatura de Recristalização (°C) |
|------------------------|-------------------------------------|
| Chumbo | -4 |
| Estanho | -4 |
| Alumínio (99,995%) | 80 |
| Alumínio (99%) | 275 |
| Aço de Baixo Carbono | 540 |

Encruado

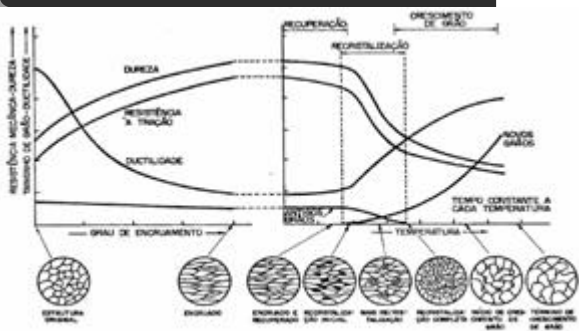


Recozido



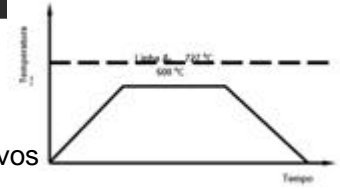
35
4

Recozimento versus recristalização



35
5

Recozimento para alívio de tensões



Tem como objetivos

Aliviar as tensões originadas

- durante a **solidificação**
- durante operações de **conformação mecânica a frio**
- **estampagem, endireitamento**
- durante a **soldagem e usinagem**.

35
6

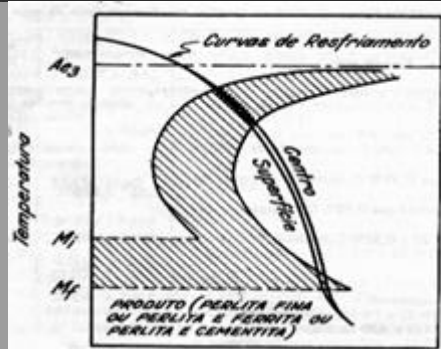
NORMALIZAÇÃO

Objetivos:

- ➔ Refinar o grão
- ➔ Melhorar a uniformidade da microestrutura

35
7

NORMALIZAÇÃO



35
8

TÊMPERA E REVENIDO

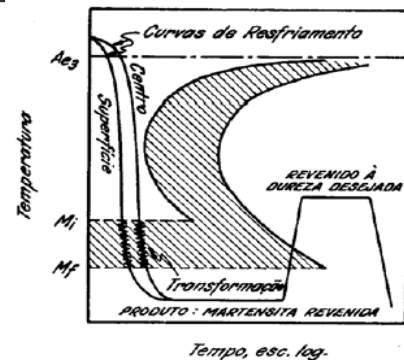
Objetivos:

- ➔ Obter estrutura metálica que promove:
 - Aumento na dureza
 - Aumento na resistência à tração
 - redução na tenacidade

*** A têmpera gera tensões ➔ deve-se fazer revenido posteriormente

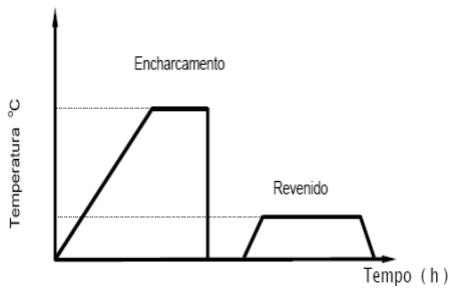
35
9

TÊMPERA E REVENIDO



36
0

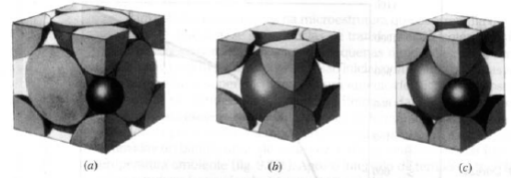
Ciclo térmico da tempera e revenido



36
1

Têmpera versus teor de carbono

- Tetragonalidade da célula unitária TCC aumenta com o teor de carbono



36
2

REVENIDO

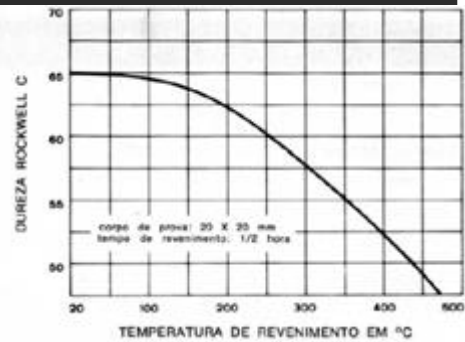
*** Sempre acompanha a têmpera

Objetivos:

- Transforma a martensita em martensita revenida
- Alivia ou remove tensões
- Corrige a dureza e a fragilidade, aumentando a dureza e a tenacidade

36
3

Temperatura de Revenido versus dureza



36
4

Orientação para as temperaturas de recozimento dos aços

| Materiais e % de carbono | Temperatura | Aquecendo à cor |
|---|---------------|--------------------|
| Aço de 0,3 a 0,5% de carbono. Poucas chispas ou estrelinhas. | 800° a 840° C | vermelho suave |
| Aço de 0,5 a 0,8% de carbono. Maior quantidade de estrelinhas que o acima. | 780° a 800° C | vermelho forte |
| Aço de 0,8 a 1,1% de carbono. Boa quantidade de chispas e estrelinhas. | 750° a 780° C | vermelho escuro |
| Aço para ferramentas 1,1 a 1,3% de carbono. Alta quantidade de estrelinhas. | 680° a 710° C | vermelho amarelado |
| Aço rápido e liga. | 720° a 850° C | vermelho claro |

36
5

COALESCIMENTO

- Objetivo

Produção de uma estrutura globular ou esferoidal de carbonetos no aço

- melhora a usinabilidade, especialmente dos aços alto carbono
- facilita a deformação a frio

36
6

Situação Problema

- Um situação real em moldes

36
7

Bibliografia

- Aços e ferro fundido. Ed. ABM. Chiaverini, V.
- Princípio da ciência dos materiais – Van Vlack, Laurence H. Ed. Edgar Blucher
- Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos, Ed. Edgard Blucher, Sérgio Augusto de Souza, 1982.
- Júnior, W. D. Callister. Materials Science and Engineering an Introductio Fourth Edition. United States, 1997.
- Eleani Maria da Costa – DEM/PUCRS – transparências internet

36
8

Ensaio de temperabilidade

Determinar e prever a temperabilidade

Temperabilidade ou endurecibilidade dos aços é a capacidade do aço endurecer da superfície em direção ao núcleo.

Têmpera superficial – resistência ao desgaste

36
9

Mas, o que é temperabilidade?

Na teoria

A capacidade do aço produzir martensita em menores taxas de resfriamento possível

Para aumentar a temperabilidade pode ser mudada a composição química do aço.

Na prática

A propriedade do aço que determina a profundidade e distribuição da dureza produzida por têmpera.

Para aumentar a temperabilidade pode ser mudada a secção da peça, o meio de têmpera.

37
0

Meios de têmpera x severidade de têmpera

| Agitação | Air | Oleo | Água | Salmoura |
|----------|------|-----------|---------|----------|
| Nenhuma | 0,02 | 0,25-0,30 | 0,9-1,0 | 2,0 |
| Fraca | | 0,30-0,35 | 1,0-1,1 | 2,0-2,2 |
| Moderada | | 0,35-0,40 | 1,2-1,3 | |
| Boa | | 0,40-0,50 | 1,4-1,5 | |
| Forte | | 0,50-0,80 | 1,6-2,0 | |
| Violenta | 0,08 | 0,80-1,1 | 4,0 | 5,0 |

Dependendo da composição do aço
Um meio de têmpera de grande severidade (Têmpera drástica)
Tende a produzir elevados valores de dureza.
Favorecendo a ocorrência de trincas e deformações

Um meio de têmpera de pouca severidade (Têmpera suave)
Tende a produzir menor dureza.
Diminuindo a propensão a ocorrência de trincas e deformações

37
1

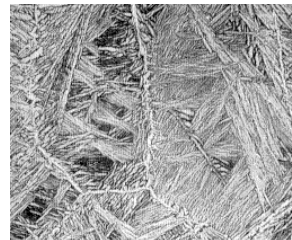
Mais martensita – maior temperabilidade
Martensita – aumento da resistência mecânica



Martensita no Aço

“A transformação Martensítica ocorre com o aumento de volume.”

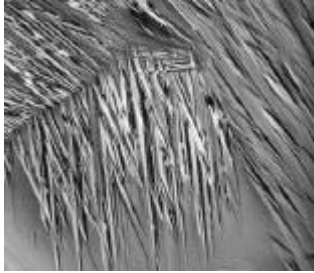
Martensita no Titânio



37
2

Martensita em Matriz de Austenita

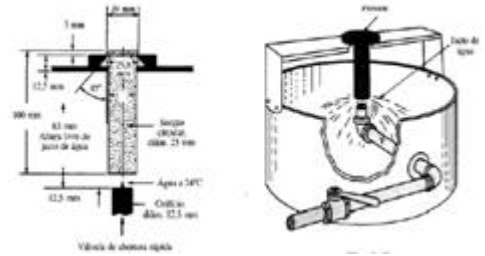
micrografia de uma liga de memória de forma (69%Cu-26%Zn-5%Al), mostrando as agulhas de martensita numa matriz de austenita



37
3

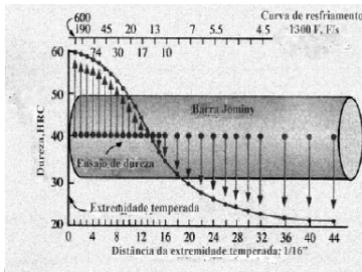
Ensaio de Temperabilidade Jominy

ABNT BM-381



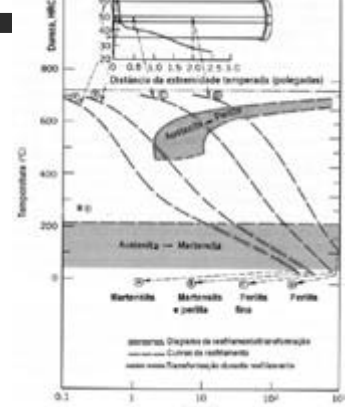
37
4 Corpo de prova de 25,5 mm de diâmetro por 10 mm

Curva de Temperabilidade Jominy



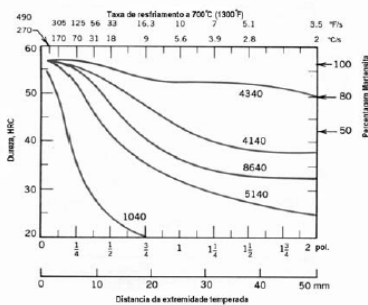
37
5

Diferentes microestruturas



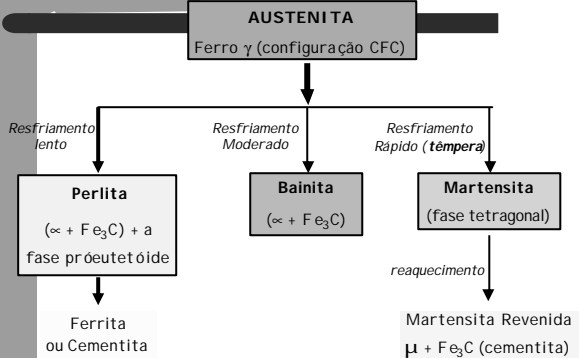
37
6

Curvas de Temperabilidade Jominy para diversos tipos de aços.

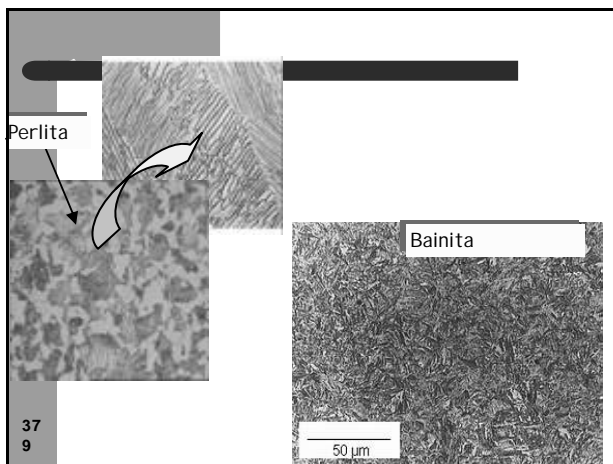


37
7

Transformações



37
8



Tratamento termoquímico

- Cementação
- Nitretação
- Carbonitretação

- Tratamentos superficiais para diminuição do desgaste
- Deposição de filmes \ni TiN, Al_2O_3 , TaC, etc

38
1

Cementação

Capa da junta homocinética de um automóvel, mostrando o alojamento das esferas de aço, com tratamento de têmpera superficial.

- Mais simples - chama oxiacetilênica
- Mais complexo e preciso – indução eletromagnética

38
2

Têmpera por indução

1. O aquecimento é tão rápido (alguns segundos na maioria dos casos), que a superfície praticamente não oxida. Nota-se apenas uma certa modificação na cor.
2. O aquecimento é perfeitamente uniforme e reproduzível de peça para peça, por meio de um rigoroso controle de tempo de aquecimento.
3. O aquecimento pode ser localizado, isto é, limitado com grande exatidão a determinadas áreas.
4. A estrutura cristalográfica do aço se mantém inalterada (dureza de forja, fundição ou laminação), pois a têmpera atinge só a superfície.
5. O calor é gerado na própria peça, objeto de tratamento. Isto ocorre sem qualquer contato com o indutor (bobina).
6. A peça não fica deformada porque as forças produzidas na superfície não chegam a alterar a forma do núcleo, que permanece frio.
7. O aquecimento indutivo proporciona a possibilidade de usar aços carbono comum na fabricação de diversas peças que, com o emprego de processos de tratamentos térmicos convencionais, deveriam ser feitos de aços especiais de alto teor de liga. Resulta disso uma grande economia na produção de certas peças.
8. O tratamento por indução pode ser facilmente automatizado, devido a grande uniformidade do processo, reduzindo-se ao mesmo tempo, a quebra e o refugo.

38
3

Têmpera por indução

9. A área de aquecimento é limitada a superfície coberta pelo indutor.
10. Pela variação de freqüência, é possível controlar com absoluta precisão a penetração do aquecimento, sendo possível limitar o processo a uma fina camada superficial. A variação da freqüência somada a do tempo de aquecimento permite obter infinitas combinações de tratamento térmico.
1. Economia por eliminação das operações de limpeza, remoção da crosta por meio de jato de areia ou outros.
2. Distorção mínima: a ausência quase absoluta de distorção durante a têmpera, elimina operações posteriores de endireitamento e retífica.
3. O processo garante alta dureza superficial, e tenacidade do núcleo, ideal para peças sujeitas a impacto.
14. Além da têmpera é possível realizar revenimentos através de equipamentos para indução eletromagnética.

38
4

Bibliografia

- Aços e ferro fundido. Ed. ABM. Chiaverini, V.
- Princípio da ciência dos materiais – Van Vlack, Laurence H. Ed. Edgar Blucher
- Júnior, W. D. Callister. Materials Science and Engineering an Introductio Fourth Edition. United States, 1997.
- Eleani Maria da Costa – DEM/PUCRS – transparências internet

38
5

Tecnologia dos materiais

Introdução

Competência: Compreender a influência da composição e processamento nas propriedades do aço
Fonte principal Villares

Como escolher um aço

Segundo a Villares

1. Reconhecer os requisitos mecânicos da peça
2. Determinar as características geométricas das peças
3. Saber a intensidade e natureza das solicitações mecânicas
4. Determinar as solicitações estáticas
5. Determinar as solicitações dinâmicas
6. Selecionar as propriedades mecânicas requeridas
7. Prever a temperabilidade

Aços inoxidáveis

- Ferríticos
- Martensíticos
- Austeníticos

Aço inoxidável austenítico 304

- Cor de identificação Prata
- C 0,08 % máx Cr 18,3 % Ni 8,5 %
- Cromo níquel
- Não magnético
- Não temperável
- Pouca ferrita
- Boa resistência à corrosão
- Tenacidade em baixas temperaturas
- Dilatação térmica 50% maior que os aços de construção

Aço inoxidável austenítico 304

- Uso – têxtil - papel - hospital – criogênia
- Fornecido recozido 160 HB - LR 600 MPa – LE 250 MPa – alongamento 50 %
- Resistência à corrosão geral
- Resiste bem a maioria dos ácidos orgânicos ácido fórmico, ácido acético CH_3COOH .
- Atacado pelo ácido sulfúrico concentrado
- Normamente resiste menos que o aço 316
- No entanto, resiste mais ao ácido nítrico e agentes oxidantes

Aço inoxidável austenítico 304

- Resistência à corrosão intercrystalina
- Quando submetido a temperatura entre 400 e 900 °C (solda)
- Mediado por recozimento de normalização.
- Se não for possível o tratamento térmico usar o aço 304 L (L do inglês low – baixo carbono).

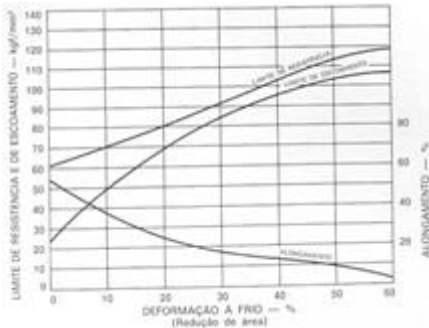
Aço inoxidável austenítico 304

- Forjamento – aquecer a 1200 °C
homogeneizar completamente – não forjar
abaixo de 930 °C
- Recristalização – 1100 °C - resfriado em água
- Solubilização – resistência à corrosão 1040 °C – resfriado em água



Aço inoxidável austenítico 304

- Diagrama de encruamento



Aço inoxidável austenítico 304

- Solda
- Evitar solda oxi-acetilênica
- Deve ser recozido após soldagem

Aços para beneficiamento

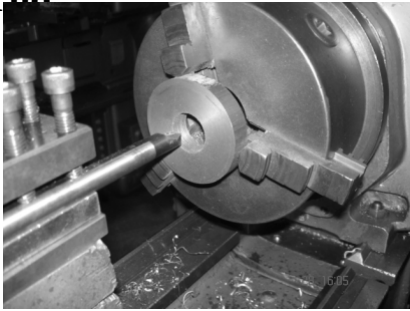
- Aço ABNT 8620
- C 0,18 – 0,23 %
- Si 0,20 – 0,35 %
- Mn 0,70 – 0,90 %
- Cr 0,40 – 0,60 %
- Ni 0,40 – 0,70 %
- Mo 0,5 – 0,25%
- Média temperabilidade
- Resistência ao desgaste
- Núcleo tenaz
- LE 7000 – 1000 MPa
- Fornecido sem tratamento térmico



Aços para beneficiamento AÇO ABNT 8620

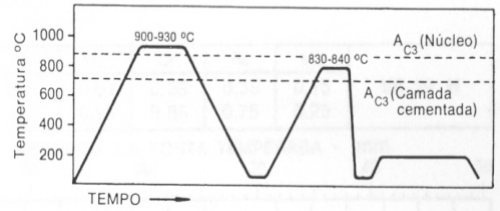
- Uso engrenagens, coroas, pinhões, pinos e ...castanhas de placas de torno.
- Forjamento – 1100 e 1200 °C – não forjar
abaixo de 850 °C
- Recozimento 860 – 880 °C
- Normalização 900 – 930 °C
- Cementação

castanhas de placas de torço

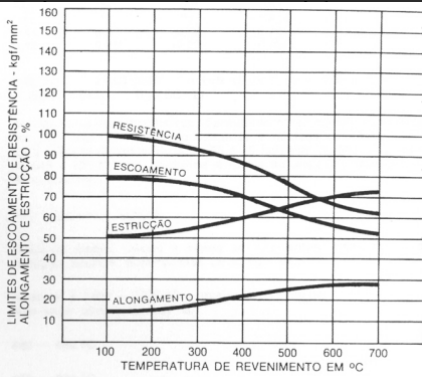


Aços para beneficiamento AÇO ABNT 8620

CICLO II — Têmpera da camada cementada com resfriamento lento após a cementação (têmpera simples em óleo).



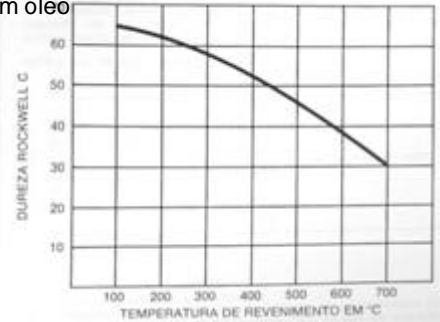
ABNT 8620



- L=4D
- Normalizado 910 °C
- Pseudo cementado a 920 °C por 4h
- Temperado em óleo 830 °C
- Revenido 2h

ABNT 8620

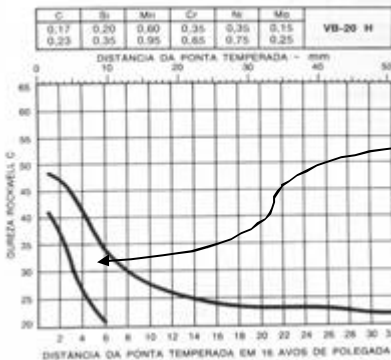
- Diâmetro de 22 mm por 10 mm
- Normalizado em óleo
- Cemento a 920 °C
- Temperado em óleo
- Revenido 2 h



ABNT 8620

Temperabilidade ABNT MB

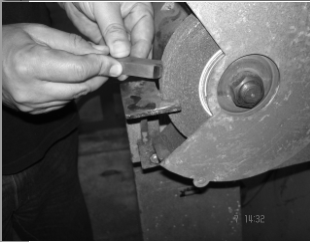
38



diferentes velocidades de corte dependendo do material da

| MATERIAL | PERMANÊNCIA DE AÇO RÁPIDO | | | | | |
|---------------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | DEBASTAR | | ACABAMENTO | | FIDELIDADE | |
| | DEBASTAR | ACABAMENTO | DEBASTAR | ACABAMENTO | DEBASTAR | ACABAMENTO |
| ACIL 1045 | 25 | 30 | 15 | 200 | 300 | |
| ACIL 1045 | 25 | 25 | 8 | 120 | 180 | |
| ACIL ESTAMPADO 1045 | 15 | 30 | 8 | 40 | 60 | |
| ACIL 1045-1045-1045 | 20 | 25 | 8 | 70 | 85 | |
| ACIL 1045-1045 | 15 | 30 | 8 | 65 | 85 | |
| ACIL 1045-1045 | 10 | 15 | 8 | 30 | 50 | |
| ACIL 1045 | 30 | 40 | 10-25 | 500 | 300 | |
| ACIL 1045 | 40 | 50 | 10-25 | 350 | 400 | |
| ACIL 1045 | 60 | 80 | 15-35 | 500 | 700 | |
| ACIL 1045 | 25 | 40 | 10-30 | 120 | 150 | |

Aço ferramenta – aço rápido



VK – 10
cor - azul marrom
azul
C 1,3 %
Cr 4,2 %
W 8,0 %
Mo 4,5 %
V 2,7 %
Co 10 %

capacidade de corte
resistência à abrasão

Ferramentas de desbaste e acabamento de materiais de difícil usinagem austeníticos, alta produtividade

Aço ferramenta – aço rápido VK 10

• Forjamento

- 1050 °C
- não forjar abaixo de 900 °C,
- Resfriar em cal, cinza ou material isolante

• Recozimento entre 830 e 870 °C,

- Tempo 2 h,
- Resfriar no forno taxa de 30 °C/h.

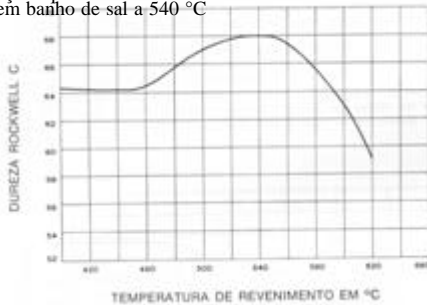
• Têmpera

- dois fornos
- pré aquecimento 820 °C
- Têmpera 1170 °C
- Ar, óleo, banho de sal a 520 – 570 °C

• Cuidado com a descarbonetação banho de sal, atmosfera controlada, imergir em borax a 150 °C

Endurecimento secundário do VK 10

Revenido tão logo a peça alcance 60 °C
Temperatura entre 560 e 570 °C
Duplo revenido após esfriado completamente
Curva abaixo após aquecidos at é 1220 °C e resfriados em banho de sal a 540 °C



Ferro Fundido

Ferro fundido

• É uma família de ligas ferrosas com uma grande variedade de propriedades:

• Diferenciam dos aços devido aos teores de Si e C:

Aços → Si (<1%) e C (<2%)

Ferro Fundido → Si (1-3%) e C (2-4%)

• Outros elementos também podem ser adicionados para variar propriedades como: resistência ao desgaste, a abrasão e a corrosão;

• Além da composição o resfriamento, a taxa de solidificação e tratamentos térmicos afetam suas propriedades.

• É muito utilizado devido ao seu baixo custo, versatilidade

Ferro Fundido

Classificação

• Existem quatro tipos que são:

• Cinzento,

• Branco,

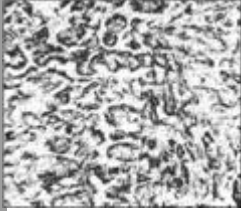
• Maleável

• Nodular - útil.

• São diferenciados pela distribuição do C na microestrutura.

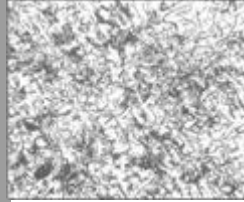
• Dois tipos podem ter a mesma composição. Não são diferenciáveis por análise química.

Ferro Fundido Branco



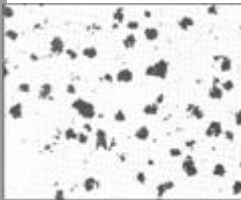
- É formado se a taxa de solidificação for suficientemente rápida;
- C e Fe forma cementita;
- São relativamente duros e frágeis devido a sua microestrutura,
- - resistência a compressão
- - resistência ao desgaste;
- Apresentam superfície de fratura de cor branca.

Ferro Fundido Cinzento



- Neste o C grafitiza-se, formando veios ou flocos de grafita;
- São os mais fluidos dentre as ligas ferrosas. Devido a esta propriedade podem produzir formas complexas na fundição;
- Tem - usinabilidade, - resistência ao desgaste;
- Superfície de fratura de cor acinzentada.

Ferro Fundido Maleável



C na forma de nódulos irregulares de grafita;

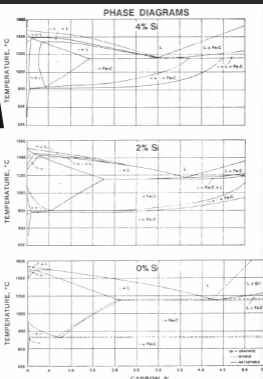
- É fundido como branco e após tratamento térmico de recozimento torna-se maleável, pois a grafita nucleia em nódulos sendo formada a partir da cementita do branco;
- Grande variedade de propriedades mecânicas podem ser obtidas variando o recozimento;
- Espessura é limitada devido a rápida taxa de resfriamento necessária para formar ferro fundido branco.

Ferro Fundido Dúctil



- Conhecido como ferro fundido Nodular;
- C na forma de esferas de grafita;
- A grafita esteroidal é obtida devido a adição de Mg;
- Composição parecida com a do cinzento, só que com menor teor de S e P;
- Ampla faixa de tensão de escoamento, e boa ductilidade.

Sistema Fe-C-Si^{sol C}



T eutético e eutetóide

- Por conterem altos teores de Silício (1-3%) e de Carbono, são considerados ligas ternárias;
- Como o Si promove a grafitação o ferro fundido pode solidificar tanto no sistema Fe-Cementita, no Fe-Grafita ou em ambos;
- Longos períodos em altas temperaturas promovem a mudança de cementita (metaestável) para grafita (estável);
- O teor de Si modifica o diagrama de fases. A adição de Si diminui a solubilidade do C, aumenta a temperatura da reação eutética e eutetóide.

Ferro Fundido Cinzento

- Como é o mais fluido dentre as ligas ferrosas podem produzir peças de alta complexidade;
- Baixo custo de produção;
- A grafita forma-se em veios ou flocos e esta morfologia proporciona características como usinabilidade, resistência a abrasão e amortecimento as vibrações;
- Sua resistência é comparável a de aços de alta resistência para aplicações onde hajam esforços de compressão.

Ferro Fundido

Cinzeno

| Classe | Resistência máxima à tração mínima, psi |
|--------|---|
| 20A | 20.000 |
| 30A | 30.000 |
| 40A | 40.000 |
| 50A | 50.000 |
| 60A | 60.000 |

* O corpo de prova de tração possui 0,88 pol. de diâmetro nominal.

- São usualmente classificados pela mínima resistência a tração suportada. A norma de classificação é a A48 – ASTM, outras classificações podem ser usadas para produtos especiais.
- A resistência depende principalmente da sua matriz, da distribuição e do tamanho da grafita;
- Podem ser hipoeutéticos ou hipereutéticos dependendo do teor de C.

Ferro Fundido

Cinzeno

Efeito da Composição Química na Microestrutura

C e Si

- São grafitizantes;
- O - do teor destes favorece a formação do FoFo cinzeno;
- O C pode existir na forma de grafita ou de cementita;
- O aumento do teor de Si desloca o eutético para a esquerda;
- As propriedades podem ser descritas em termos de Carbono Equivalente através da relação:

$$\text{Carbono Equivalente} = \%C + 1/3 (\%Si)$$

Ferro Fundido

Cinzeno

Efeito da Composição Química na Microestrutura

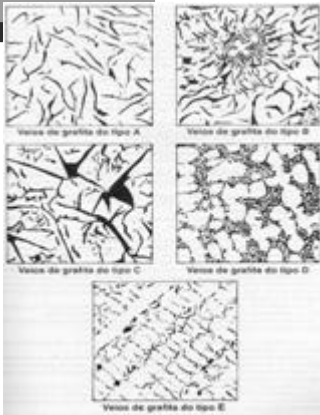
S e Mn

- Para FoFos dúcteis o S deve ser mantido baixo para permitir formação de grafita, quando o Mn é adicionado;
- Sem Mn o S liga-se ao Fe formando FeS que é frágil e quebradiço;
- Com Mn, este se liga ao S formando MnS e precipitando aleatoriamente, assim evitando a fragilização;
- Se adicionados sozinhos restringem a grafitação. São estabilizadores de carbonetos;

Grafitação

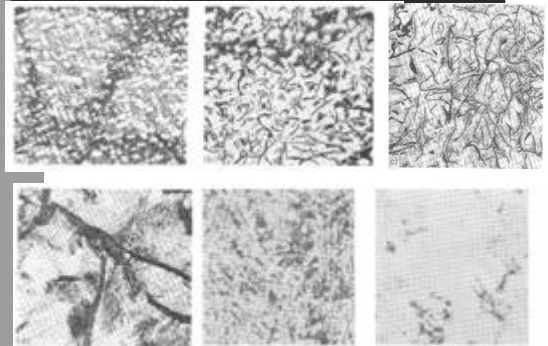
- Desenvolvimento de veios de grafita
- Cinco tipos básicos (A até E)
- Adição de inoculantes muda a configuração da grafita

5 tipos de flocos de grafita

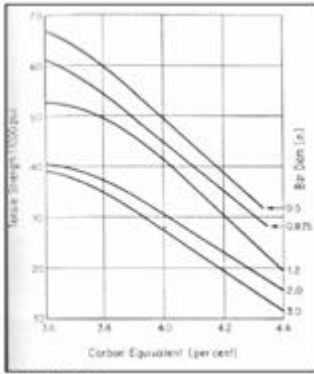


Grafitação

Microestrutura



Propriedades Mecânicas



Efeito do carbono equivalente e do tamanho da seção na resistência à tração de barras de ferro fundido cinzento

técnico acabaria aqui

Outras Propriedades

- Resistência ao desgaste
- Usinabilidade
- Capacidade de amortecimento

Ferro Fundido Cinzento

Efeito da Composição Química na Microestrutura

P

- forma esteadita, que segrega nos contornos das células de solidificação;
- como a esteadita é dura e frágil, o aumento da quantidade de esteadita aumenta a dureza, a fragilidade, e a resistência ao desgaste, o que pode ser desejável em algumas aplicações.

Ferro Fundido Maleável

- Boa tenacidade e ductilidade;
- Resistência à corrosão;
- Carboneto de ferro do FoFo branco transformado em estrutura maleável;
- Alta resistência, possui matriz de martensita temperada.

Tratamento Térmico (ferríticos)

- Nucleação;
- Eliminação de carbonetos;
- Resfriamento lento.

Nucleação

Fatores que influenciam a nucleação da grafita:

- composição química;
- taxa de aquecimento;
- tamanho da secção;
- pré-tratamento.

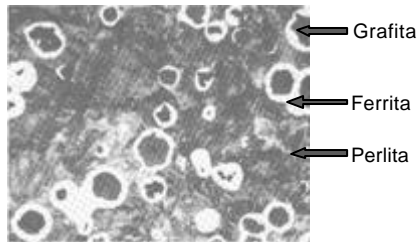
Ferro Fundido Perlítico

- aumento da resistência;
- redução da ductilidade;
- recozimento seguido de têmpera.

Ferro Fundido Ductil

(Nodular)

Definição: Consiste de grafitas esferoidais dispersas em uma matriz de ferrita e/ou perlita



Ferro Fundido Ductil

(Nodular)

Para que o carbono forme grafita esferoidal é necessário que sejam feitos dois tratamentos durante o processo de fundição.

- Inoculação → adição de Fe-Si (agente inibidor da formação de carbetos)
- Nodularização → adição de Mg ou Fe-Si-Mg (impede a ação do S e de óxidos)

Ferro Fundido Ductil

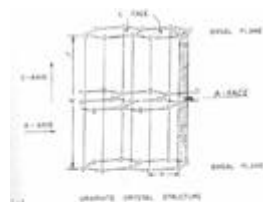
(Nodular)

Solidificação:

- Combinação de interface instável metal-plano basal de crescimento;
- Remoção de S e de óxidos;
- A nucleação da grafita ocorre de forma semelhante a nucleação da grafita no FoFo cinzento;
- Produto da nodularização pode agir como núcleos ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Ferro Fundido Ductil

(Nodular)



Relação entre as direções de crescimento da grafita esferoidal e em "flocos".

Ferro Fundido Dúctil

(Nodular)

Efeito da Composição Química:

- Carbono – 3-4%, mas 3,6-3,9% é mais comum;
 - ↑ % de C → maior densidade de nódulos de grafita;
- Silício - 1,8 a 2,8 % - ↑ resistência α no nodular.
 - ↑ Si - ↑ nº de nódulos ↓ Si - ↑ tendência coquilhamento
 - ↓ Si - formação excessiva de carbetos nas seções finas;
- Enxofre – < 0,03 % após nodularização, <0,015 % ;
- Fósforo – 0,1%, usual 0,05% - afeta ductilidade e propriedades mecânicas;
- ↓ Pb, Ta, Zr, Al, Sb – Formadores de grafita em flocos;
- ↓ As, B, V, Cr, Sn – Formadores de perlita e/ou cementita.

Ferro Fundido Dúctil

(Nodular)

Tratamento Térmico:

- Através de tratamento térmico
- resistência é possível variável de 60-120 Ksi.
- As diferentes classes do dúctil podem ser produzidas através da mudança da microestrutura da matriz.
- Inicialmente o ferro apresenta matriz totalmente ferrítica. Após tratamento pode apresentar matriz de perlita com ferrita, de martensita ou de martensita revenida.

Ferro Fundido Dúctil

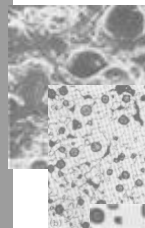
(Nodular)

Tratamento Térmico:

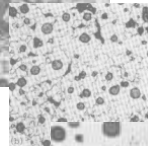
- Alívio de Tensões: aquecimento a 538-675 °C por 1 hora + 1 hora adicional/pol espessura.
- Recozimento: ↑ ductilidade e melhora a usinagem
 - Estágio único: 788°C, 6h e resfriado ao forno.
 - Duplo estágio: 900°C, 130°C/h, por 4 horas
 - 22°C/h, até 692°C, por 6 horas, resfriado ao forno;
- Normalização e Revenimento: ↑ a resistência
 - Normalização - 900°C por 1h → resfriamento ao ar
 - Revenimento 1h a 566°C;
- Tempera e Revenido – Banho de óleo → Martensita
- Tratamentos de austêmpera e martêmpera.

Ferro Fundido Dúctil

(Nodular)



F. dúctil como fabricado (grafita secundária e ferrita "olho de touro" em torno de nódulos de grafita primária;



F. dúctil perlítico como fabricado e recozido 6h a 788°C e resfriado ao forno. A maior parte da ferrita se decompôs, resultando em uma matriz de ferrita livre (região clara) e 5% de perlita (região escura e irregular).



f. dúctil ferrítico aquecido a 900°C a 139°C/h, mantido por 4h, resfriado a 22°C/h até 691°C, mantido por 6h e resfriado ao forno. Nódulos de grafita e matriz ferrítica.

Ferro Fundido Dúctil

(Nodular)

Propriedades Mecânicas – Vantagens em relação ao FoFo Cinzento:

- Baixo ponto de fusão;
- Boa fluidez e fundibilidade;
- Excelente usinabilidade;
- Boa resistência ao desgaste;
- Alta resistência, ductilidade, tenacidade;
- Alta trabalhabilidade a quente;
- Limite de escoamento mais alto que cinzento.

Ferro Fundido Dúctil

(Nodular)

Resistência ao Desgaste:

A grafita esferoidal pode reter óleos prevenindo a abrasão e o trincamento das peças quando utilizadas em movimento relativo. A resistência ao desgaste do dúctil é equivalente ao cinzento.

Ferro Fundido Dúctil

(Nodular)

Propriedades mecânicas dos ferros fundidos dúcteis

| Classe | 65-45-12 | 80-55-06 | 100-70-03 | 120-90-02 |
|---|----------|----------|-----------|-----------|
| Dureza, Bhn | 167 | 192 | 235 | 331 |
| Tração: | | | | |
| Máxima resistência 10 ³ psi | 67,3 | 81,1 | 118,6 | 141,3 |
| Tensão de escoamento a 0,2 % 10 ³ psi | 48,2 | 52,5 | 98,2 | 125,3 |
| Elongamento % em 2 in | 15,0 | 11,2 | 4,5 | 1,5 |
| Módulo de elasticidade 10 ⁴ psi | 24,4 | 24,5 | 23,5 | 23,8 |
| Coefficiente de Poisson | 0,29 | 0,31 | 0,28 | 0,28 |
| Compressão: | | | | |
| Tensão de escoamento a 0,2 % 10 ³ psi | 52,5 | 56,0 | 87,5 | 133,5 |
| Módulo de elasticidade 10 ⁴ psi | 23,6 | 23,9 | 22,7 | 23,8 |
| Coefficiente de Poisson | 0,31 | 0,31 | 0,27 | 0,27 |
| Torção: | | | | |
| Tensão de cisalhamento 10 ³ psi | 68,9 | 73,1 | 87,3 | 126,9 |
| Tensão de escoamento a 0,0375 % 10 ³ psi | 30,0 | 28,0 | 47,3 | 71,3 |
| Módulo de cisalhamento 10 ³ psi | 9,3 | 9,0 | 8,7 | 9,2 |

Ferro Fundido Dúctil

(Nodular)

Aplicações Típicas:

Classes comuns e aplicações típicas de ferros fundidos dúcteis

| Tipo TS-YS-% elongamento | Resistência máxima, psi | Tensão de escoamento, psi | Elongamento típico, % | Dureza, Bhn | Tratamento térmico | Microestrutura típica | Aplicações típicas |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------|----------------------|-----------------------|--|
| 60-40-8 | 60.000 | 40.000 | 18 | 137 – 170 | Recozido | Totalmente ferrítico | Fundidos sob pressão tal como válvula ou corpos de bombas |
| 65-45-12 | 65.000 | 45.000 | 12 | 149 – 229 | --- | Ferrítico | Fundidos sujeitos a choques e carregamentos em fadiga |
| 80-55-06 | 80.000 | 55.000 | 6 | 179 – 255 | --- | Ferrítico e perlítico | Engrenagens de manivelas e cilindros |
| 100-70-03 | 100.000 | 70.000 | 3 | 229 – 302 | Normalizado | Totalmente perlítico | Engrenagens de alta resistência, componentes automotivos e de máquinas |
| 120-90-02 | 120.000 | 90.000 | 2 | 250 – 350* | Temperado e revenido | Martensita revenida | Pinos, engrenagens, cilindros |

Ferro Fundido Branco

Definição: Ferro fundido nos quais o excesso de carbono está na forma de carbonetos de ferro ao invés de flocos ou nódulos de grafita. Pode ser apresentado na forma ligado ou não-ligado.

- Não- ligados: matriz perlítica fina
- Ligados: Matriz martensítica, bainítica ou austenítica. Adição de Ni, Cr ou Mo

Ferro Fundido Branco

Composição química e dureza de ferros fundidos brancos típicos

| | % C | % Si | % Mn | % Cr | % Ni | % P, máx. | % S, máx. | EBH, mín. |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ferro fundido branco Capola | 3,30-3,60 | 0,40-1,00 | 0,50-0,70 | --- | --- | 0,30 | 0,15 | 400 |
| Ferro fundido branco Capola (1% Cr) | 3,30-3,60 | 0,40-1,00 | 0,50-0,70 | 0,80-1,00 | --- | 0,30 | 0,15 | 444 |
| Ferro fundido branco maleável | 2,20-2,50 | 1,00-1,60 | 0,30-0,50 | --- | --- | 0,15 | 0,15 | 321 |
| Ferro fundido martensítico níquel-cromo | 1,00-1,60 | 0,40-0,70 | 0,40-0,70 | 1,40-3,50 | 4,00-4,75 | 0,40 | 0,15 | 550 |
| Ferro fundido martensítico níquel-cromo de alta tenacidade | 2,90 máx. | 0,40-0,70 | 0,40-0,70 | 1,40-3,50 | 4,00-4,75 | 0,40 | 0,15 | 525 |
| Ferro fundido branco alto cromo | 2,25-2,85 | 0,25-1,00 | 0,50-1,25 | 21,0-30,0 | --- | 0,40 | 0,15 | 500 |

Ferro Fundido Branco ao

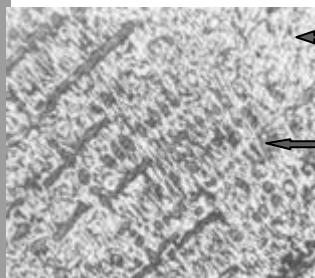
Cr

Características do Cr:

- Forte estabilizador de carbonetos;
- Alta tendência de formar branco;
- Suprime a formação da grafita;
- 1 – 4%: ↑ dureza e resistência à abrasão;
- 12 – 35%: ↑ resistência à oxidação e corrosão e ↑ resistência à abrasão.

Ferro Fundido Branco ao

Cr



← Rede de Carbonetos de Ferro

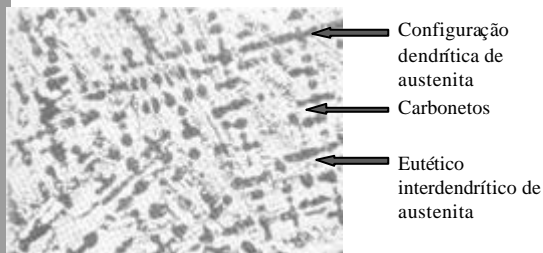
← Configuração dendrítica

Ferro Fundido Branco ao Ni-Cr

- Vantagens Ni-Cr: ↑ resistência à tração, à oxidação e corrosão.
- Características dos elementos individualmente:
 - Ni: estabiliza a grafita;
 - Cr: estabiliza o carboneto de ferro (Fe_3C);
 - Pequenas quantidades de Ni e Cr (2 e 1%) refinam a matriz perlítica do branco.

Ferro Fundido Branco ao Ni-Cr

Microestrutura: Matriz austenítica



- Se trabalhado em ↑ abrasividade ⇒ austenita → martensita

Ferro Fundido Resistente à corrosão

Ferro fundido ↑Si, ↑Cr e ↑Ni

Composição química e propriedades mecânicas de diversas ligas de ferro fundido resistentes à corrosão
Tipos de ferro fundido

| Análise | Alto silício (Ductiron) | Alto Cromo | Alto Níquel (Ni-resist) |
|---|-------------------------|------------|-------------------------|
| % Carbono | 0,4 - 1,0 | 1,2 - 2,5 | 1,8 - 3,0 |
| % Silício | 14 - 17 | 0,5 - 2,5 | 1,0 - 2,75 |
| % Manganês | 0,4 - 1,0 | 0,3 - 1,0 | 0,4 - 1,5 |
| % Níquel | — | 0 - 5 | 14 - 30 |
| % Cromo | — | 20 - 35 | 0,5 - 5,5 |
| % Cobre | — | — | 0 - 7 |
| % Molibdênio | 0 - 3,5 | — | 0 - 1 |
| Dureza Brinell | 450 - 500 | 290 - 400 | 100 - 230 |
| Resistência máxima à tração, 1000 psi | 13 - 18 | 30 - 90 | 25 - 45 |
| Resistência máxima à compressão, 1000 psi | — | 100 - | 100 - 160 |
| Impacto Charpy, * ft. lb. | 2 - 4 | 20 - 35 | 60 - 150 |

* Ferro de 1,2 in. de diâmetro não entalhado, gravitado em água de 9 in. Alto fundido corrosivo com um 25 a 15 ft. 50.1

Ferro Fundido Alto Silício

Características:

- 12-18% ⇒ resistente à corrosão ácida;
- 14,5 ou mais ⇒ resistente à ácido sulfúrico 30%;
- 16,5% ⇒ resistente à ácido sulfúrico e nítrico;
 - ⇒ propriedades mecânicas ruins;
 - ⇒ ↓ resistência à choque térmico e mecânico;
 - ⇒ difíceis de vazar;
 - ⇒ não usináveis.

Ferro Fundido Alto Silício



a) 14,5%Si como fundido. Com grafita flocular tipo A (preto) em matriz de solução sólida de ferrita Fe-Si



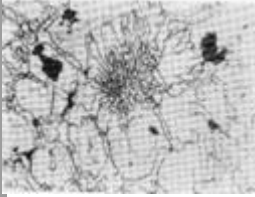
b) 0,9%C, 14,5%Si, 1%Mn, 4,5%Cr como fundido. Foco cinzento com flocos de grafita dos tipos A e E (preto) e $(Fe, Cr)_3C$ interdendrítico (branco, contornado) em matriz de ferrita Fe-Si-Cr dendrítica

Ferro Fundido Alto Cromo

15-30% de Cr

- Fornece resistência à abrasão e oxidação.
- Aplicações: Para trabalhos com ácidos fracos sob condições:
 - oxidantes;
 - alta solução ácida org.;
 - soluções salinas.
- Tem propriedades melhores que as ↑ Si.

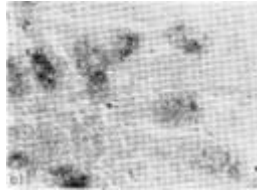
Ferro Fundido Alto Cromo



Região clara contornada: Eutético
(Cr, Fe)₇C₃

Cinza: perlita

Matriz: Ferrita em solução sólida Fe-Cr



Assim como o anterior, porém normalizado a 1010°C, resfriado ao ar e revenido a 260°C.

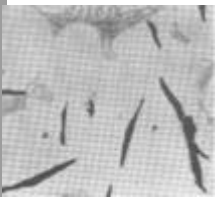
Matriz: Martensita revenida

Ferro Fundido Alto Níquel

Conhecido como "Ni-Resist".

- Ferro cinzento austenítico com 14-30% de Ni resistem à ácidos oxidantes de média força.
- São os mais tenazes de todos os ferros fundidos resistentes à corrosão
- Vantagens: boa usinabilidade; boas propriedades de fundição; ↑ resistência mecânica e ductilidade.
- Desvantagem: ↓ resistência à tração.

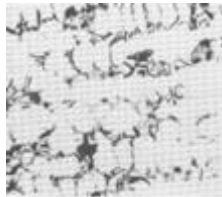
Ferro Fundido Alto Níquel



Matriz austenítica de ↑ Ni

Preto: grafita do tipo A em flocos

Cinza: (Fe, Cr)₃C



Matriz austenítica

Preto: Grafita interdendrítica D e E

Região clara contornada: carbonetos interdendríticos

Ligas de Ferro Fundido resistentes ao Calor

Ligas de Fe-C-Si com adição de Si, Cr, Ni, Mo ou Al

| Análise | Tipos de Ferro fundido | | | | |
|---|------------------------|------------|-------------------------|----------------------|---------------|
| | Alto silício (silú) | Alto cromo | Alto níquel (Ni-Resist) | Níquel-cromo-silício | Alto alumínio |
| % Carbono | 1,6 - 2,5 | 1,8 - 3,0 | 1,8 - 3,0 | 1,8 - 2,6 | 1,3 - 2,0 |
| % Silício | 4,0 - 6,0 | 0,5 - 2,5 | 1,0 - 2,75 | 5,0 - 6,0 | 1,3 - 6,0 |
| % Manganês | 0,4 - 0,8 | 0,3 - 1,5 | 0,4 - 1,5 | 0,4 - 1,0 | 0,4 - 1,0 |
| % Níquel | --- | 0 - 5 | 14 - 30 | 13 - 32 | --- |
| % Cromo | --- | 15 - 35 | 1,75 - 5,5 | 1,8 - 5,5 | --- |
| % Cobre | --- | --- | 0 - 7 | 0 - 10 | --- |
| % Molibdênio | --- | --- | 0 - 1 | 0 - 1 | --- |
| % Alumínio | --- | --- | --- | --- | 20 - 25 |
| Dureza Brinell | 170 - 250 | 250 - 500 | 150 - 250 | 110 - 210 | 180 - 350 |
| Resistência máxima à tração, 1000 psi | 25 - 45 | 30 - 90 | 25 - 45 | 20 - 45 | 13 - 16 |
| Resistência máxima à compressão, 1000 psi | 90 - 150 | 100 - | 100 - 160 | 70 - 100 | --- |
| Impacto Charpy,* B-ft | 15 - 23 | 20 - 35 | 60 - 150 | 80 - 150 | --- |

* Baseado em 1/2 in de diâmetro nos ensaios, aquecidos em forno de 4 in (cerca) sendo resfriados com água a 150 °F (65 °C).

Ferro Fundido comum a altas temperaturas

Características acima de 425°C:

- muda propriedades de crescimento e oxidação
- Crescimento: aumento do volume
- Oxidação ⇒ ocorre na superfície do FoFo a altas temperaturas.
 - ⇒ forma escamas;
 - ⇒ perda de material.

Ferro Fundido ao Cr resistente ao calor

Características:

- Estabiliza Carbonetos
 - Forma um óxido protetor na superfície do material
 - Após extenso trabalho a altas temperaturas: matriz perlítica → ferrita + cementita esferoidizada
 - 15-30% Cr – Excelente resistência à oxidação
- Desvantagem: baixa usinabilidade

Ferro Fundido ao Cr resistente ao calor

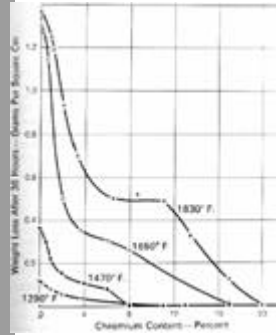


Preto: Flocos de Grafita A
Matriz: Perlita → Fe₃C + grafita



Extensivo trabalho a alta temperatura
Matriz atual: Ferrítica

Efeito do Cr na perda de massa por oxidação



1% Cr a 800°C

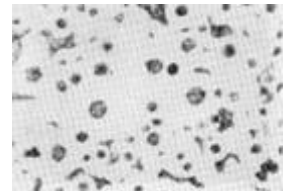
10% Cr a 900°C

15% Cr a 1000°C

Ferro Fundido Alto Si Resistente ao Calor

- Abaixo de 3,5%: aumenta a grafitação, logo aumenta a taxa de crescimento do F. cinzento;
- 4-8%: Abaixa a taxa de crescimento e abaixa a oxidação
- Silício (alfagênico): eleva a temperatura para 900°C

Ferro Fundido Alto Si Resistente ao Calor



Escuro irregular (15%): Perlita

Claro (85%): Ferrita Livre

Escuro redondo: Nódulo de grafita

Carbono- Temperado

Ferro Fundido Alto Ni Resistente ao Calor

Características:

- Boa resistência à escamação a altas temperaturas
- Em atmosfera com enxofre a quantidade de Ni destas ligas restringe seu uso à temperaturas abaixo de 500 °C
- Alta tenacidade
- Resistência ao Choque melhor que com Si ou Cr
- Grafita nodular oferece maior resistência e ductilidade do que a grafita em flocos

Ferro Fundido Dúcteis Austemperados

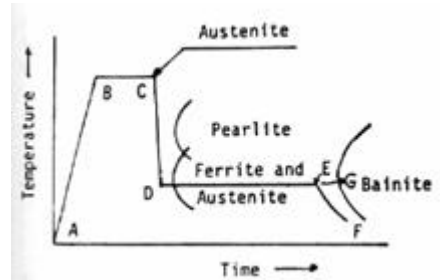
Características:

- Combinam boa resistência mecânica e boa resistência ao desgaste
- Aplicações: maquinaria pesada e equipamentos de transporte

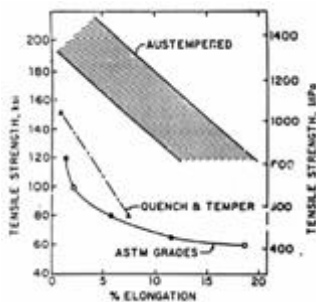
Ferro Fundido Dúcteis Austemperados

- 871 – 927°C
- Têmpera em salmoura ↑ Ms
- Tratamento isotérmico 316 – 371°C
- Resfriamento a Temperatura Ambiente

Ferro Fundido Dúcteis Austemperados



Ferro Fundido Dúcteis Austemperados



Ferro Fundido Dúcteis Austemperados

Norma ASTM A 897-90 e A 897M-90 propriedades mecânicas requeridas para ferros fundidos dúcteis austemperados.*

| Classe | Tensão Max. (min) | | Tensão Esc. (min) | | Alongação, % | Impacto** | | Dureza, HB% HB*** |
|-------------|-------------------|-----|-------------------|-----|--------------|-----------|---------|----------------------|
| | MPa | ksi | MPa | Ksi | | J | ft. lbf | |
| 125-80-10 | ... | 125 | ... | 80 | 10 | ... | 75 | 269-321 |
| 850-550-10 | 850 | ... | 550 | ... | 10 | 100 | ... | 269-321 |
| 150-100-7 | ... | 150 | ... | 100 | 7 | ... | 60 | 302-363 |
| 1050-700-7 | 1050 | ... | 700 | ... | 7 | 80 | ... | 302-363 |
| 175-125-4 | ... | 175 | ... | 125 | 4 | ... | 45 | 341-444 |
| 1200-850-4 | 1200 | ... | 850 | ... | 4 | 60 | ... | 341-444 |
| 200-155-1 | ... | 200 | ... | 155 | 1 | ... | 25 | 388-477 |
| 1400-1100-1 | 1400 | ... | 1100 | ... | 1 | 35 | ... | 388-477 |
| 230-185 | ... | 230 | ... | 185 | **** | ... | **** | 444-555 |
| 1600-1300 | 1600 | ... | 1300 | ... | **** | **** | ... | 444-555 |

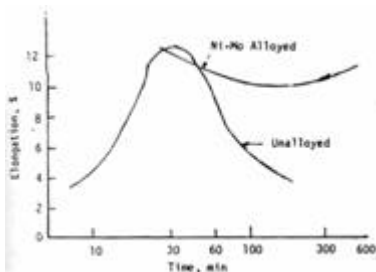
*Metals Handbook" vol. 1, 10ed., ASM International, 1990, p.34.

** Barras testadas em ensaio Charpy sem entalhe a 22-4 °C. Os valores na tabela são o mínimo para a média dos três maiores valores dos testes de quatro amostras testadas.

*** A dureza não é mandatória e serve apenas como informação.

**** Os requerimentos de alongação e impacto não são especificados. Entretanto as classes 200-155-1, 1400-1100-1, 230-185, 1600-1300 são principalmente usadas em engenharia e aplicações que exigem resistência ao desgaste, as classes 200-155-1 e 1400-1100-1 possuem aplicações onde algum sacrifício na resistência ao desgaste é aceitável para fornecer uma quantidade limitada de ductilidade e tenacidade.

Ferro Fundido Dúcteis Austemperados



Ferro Fundido Dúcteis Austemperados

- ADIs fornecem material com ↑ resistência mecânica boa resistência ao desgaste e boa tenacidade.
- Engrenagens e Engenharia pesada, no presente

Bibliografia

- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª Edição, Associação Brasileira de Metais. São Paulo, 2002.
- SMITH, William F. **Structure and Properties of Engineering Alloys**. 2nd ed., McGraw-Hill, Inc.
- ALBA Quimica, **Resinas Sintéticas Para Fundição**. 1ª ed. 1989.

Elabore uma resenha
sobre esta
apresentação sobre
ferro fundido !!!!!!!
Gracie.



Técnicas Experimentais em
Ciências dos Materiais

Profª. Ingeborg Kühn

ENSAIO METALOGRÁFICO MACROGRAFIA E MICROGRAFIA

_____ Hélio Ormeu Ribeiro

METALOGRAFIA

Henri Clifton Sorby (1826 – 1908)

Primeira estrutura metálica ao
microscópio P 1863



DEFINIÇÃO: é o estudo e interpretação da estrutura interna dos materiais a partir de uma superfície preparada, e a relação dessas estruturas com as suas composições químicas, propriedades físicas e mecânicas.

OBJETIVOS DA METALOGRAFIA:

- ✓ Identificar o tipo, tamanho, local e a intensidade das discontinuidades;
- ✓ Identificar o processo de fabricação da peça;
- ✓ Identificar o tipo de tratamento térmico ou termoquímico;
- ✓ identificar a profundidade da camada carbonetada ou descarbonetada;
- ✓ Observar e identificar zonas de alterações térmicas sofridas por soldagem;
- ✓ Observar penetração do cordão de solda;
- ✓ Identificar tipos de inclusões;
- ✓ Identificar a formas de grafita;
- ✓ Tamanho do grão;
- ✓ etc;

CLASSIFICAÇÃO:

a) Quanto ao tipo de ensaio:

- ✓ Ensaio Metalográfico DESTRUTIVO;
- ✓ Ensaio Metalográfico NÃO DESTRUTIVO.

b) Quanto a ampliação da imagem metalográfica:

Ensaio metalográfico
MACROGRÁFICO



Fig. 101 - Flux superficialmente isolado
para um ensaio metalográfico. Representação
microscópica por reflexão de luz. 100x.
Magnificação: 1000x em 1000. 1.0.0.

Ensaio metalográfico
MICROGRÁFICO.



Fig. 102 - Metal em uma estrutura de 1000x. A estrutura de superfície da superfície
de metalização por reflexão de luz. 1000x. Magnificação: 1000x em 1000. 1.0.0.

ENSAIO MACROGRÁFICO

Visualização com uma aplicação de no máximo dez vezes

⇒ olho nu ou lupa

- Objetivos** ⇒ determinar o tipo, a forma, o tamanho, o local e a intensidade das continuidades;
⇒ identificar o processo de fabricação da peça;
⇒ zonas de alteração térmica, etc.

ENSAIO MICROGRÁFICO

Visualização com um grau de ampliação superior a dez vezes

⇒ Microscópio Óptico ou Eletrônico

- Objetivos** ⇒ determinar o tipo de micro inclusão,
⇒ a forma da grafita,
⇒ o tipo de tratamento térmico ou termoquímico
⇒ a granulação (tamanho e forma)
⇒ os micro-constituintes do material, etc.

ETAPAS DO ENSAIO METALOGRÁFICO

1. Conversa com o interessado
2. Escolha da seção a ser cortada
3. Corte da amostra na seção escolhida
4. Montagem da amostra
5. Marcação para identificação
6. Lixamento da amostra na seção cortada
7. Polimento da amostra na seção lixada
8. Interpretação antes do ataque
9. Ataque com reativo adequado
10. Interpretação depois do ataque
11. Conclusão do ensaio

1. CONVERSA COM O INTERESSADO

- ⇒ histórico e história da amostra (peça)
⇒ não deve dar início ao ensaio, sem antes discutir com o interessado.



2. ESCOLHA DA SEÇÃO A SER CORTADA

Seções de corte: ⇒ Transversal ou Longitudinal

- a) Corte transversal, se o objetivo é verificar:
- ✓ A natureza do material: aço, ferro fundido;
 - ✓ A forma e a intensidade da segregação;
 - ✓ A posição, a forma e dimensões das bolhas;
 - ✓ A profundidade da têmpera e cementação, etc.
- b) Corte longitudinal se o objetivo é:
- ✓ Verificar o processo de fabricação (fundição, forjamento, etc);
 - ✓ A solda em barras;
 - ✓ Como se processou um caldeamento de topo, etc.

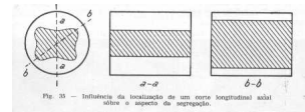


Fig. 33 - Indicação da localização de um corte longitudinal axial sobre o segmento de segregação.

3. CORTE DA AMOSTRA NA SEÇÃO ESCOLHIDA

- Meios de corte ⇒ corte por abrasão a úmido.
⇒ corte por abrasão a seco.

- Discos de corte ⇒ abrasivo óxido de alumínio;
⇒ carbeto de silício;
⇒ diamante.

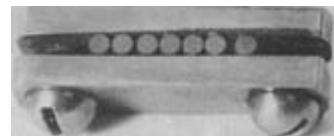
Cuidados: não aquecer a mais de 100°C.



4. MONTAGEM DA AMOSTRA

- ✓ Facilitar o manuseio de peças pequenas.
- ✓ Evitar que as amostras danifiquem as lixas e o pano metalográfico.
- ✓ Evitar o abaulamento durante o polimento.
- ✓ Permitir que seja feito um estudo da periferia da amostra.

- a) **Fixação** ⇒ séries de amostras com dimensões constantes



b) Embutimento

Embutimento a frio

- ⇒ montagem de corpos de prova frágeis e de pequenas dimensões
- ⇒ resinas auto-polimerizáveis
- ⇒ tempo de endurecimento de 0,2 a 24h.



Embutimento a quente

- ⇒ montagem de corpos de prova em prensas



Embutimento a Vácuo



5. MARCAÇÃO DA AMOSTRA PARA IDENTIFICAÇÃO



6. LIXAMENTO DA AMOSTRA NA SECCÃO CORTADA

- O lixamento ⇒ diminui o grau de rugosidade da superfície
- ⇒ melhora a qualidade da imagem obtida.



Lixadeira Metalográfica Manual Rotativa por Via Úmido



Lixadeira Metalográfica Manual Estacionária por Via Úmido

7. POLIMENTO DA AMOSTRA NA SECCÃO LIXADA

- O polimento ⇒ aumentar a nitidez da imagem
- ⇒ visualização da amostra no microscópio metalúrgico.

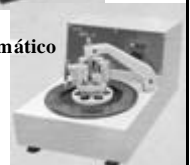
Polimento Mecânico

- Os abrasivos mais utilizados são:

- ✓ Óxido de cromo (Cr_2O_3)
- ✓ Óxido de magnésio (MgO)
- ✓ Óxido de alumínio (Al_2O_3 – alumina)
- ✓ Diamante sintético ou natural



Manual



Automático

Polimento eletrolítico



8. INTERPRETAÇÃO DA SECCÃO LIXADA ANTES DO ATAQUE

- Imagens reveladoras que podem desaparecer com o ataque da secção pelo reativo

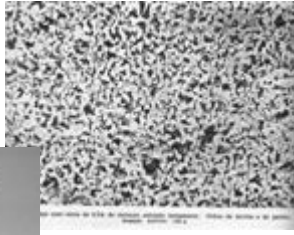
9. ATAQUE DA SUPERFÍCIE POR UM REATIVO ADEQUADO

- ⇒ soluções alcoólicas de ácidos, bases e sais, bem como sais fundidos ou vapores.
- ⇒ as condições de ataque tais como composição química, temperatura e tempo, podem ser variadas para atingir as mais diversas finalidades de contraste.
- ⇒ **Técnicas de ataque:** imersão, gotejamento, lavagem, esfregamento, ataque-polimento.

10. INTERPRETAÇÃO APÓS O ATAQUE



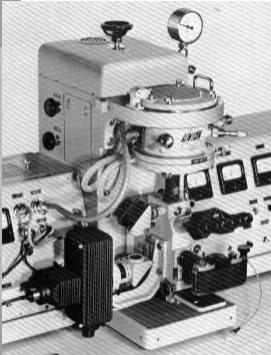
Macrografia



Micrografia

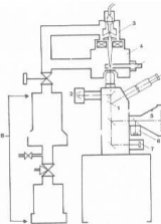


METALOGRAFIA ÓPTICA EM ALTA TEMPERATURA



Observa as mudanças na estrutura dos materiais em altas temperaturas

Oxidação / Vaporização da amostra



- 1 - sistema óptico.
- 2 - iluminador de alta intensidade de Xenônio.
- 3 - base eletrônica de aquecimento.
- 4 - placa de aquecimento.
- 5 - sistema cine-fotográfico.
- 6 - exposímetro.
- 7 - detector de radiação infravermelha de PIR para medição de temperatura.
- 8 - bomba de difusão a vácuo - sistema de vácuo.

TÉCNICAS COMPLEMENTARES

METALOGRAFIA E MICRODUREZA

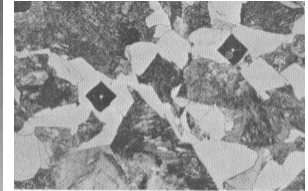
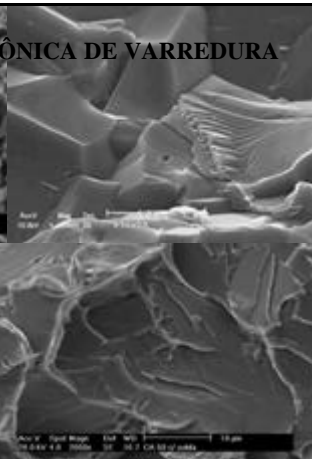
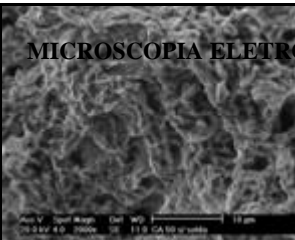


Fig. 20. - Impressão obtida na área desejada.

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA



EXEMPLOS LITERÁRIOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA

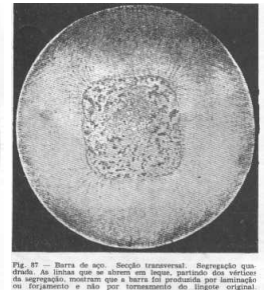
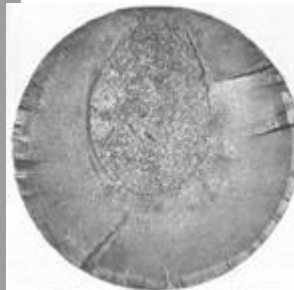
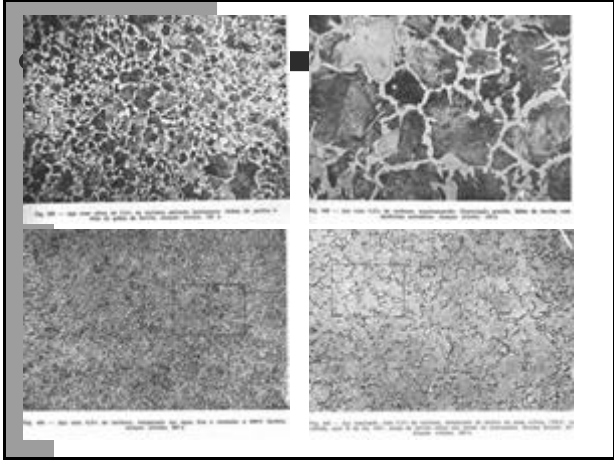
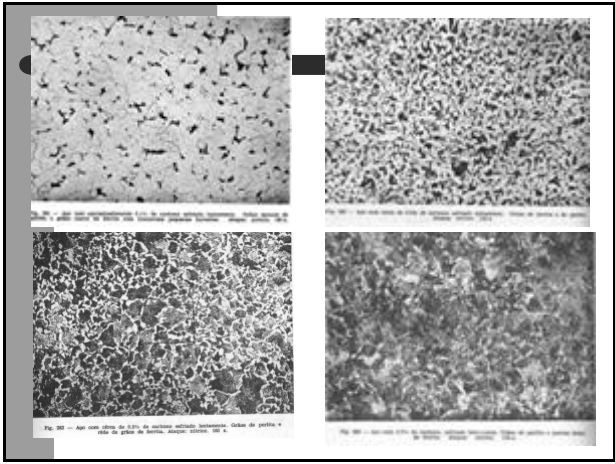
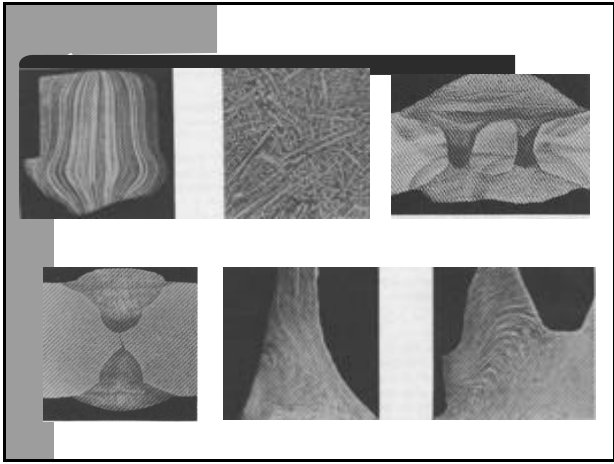
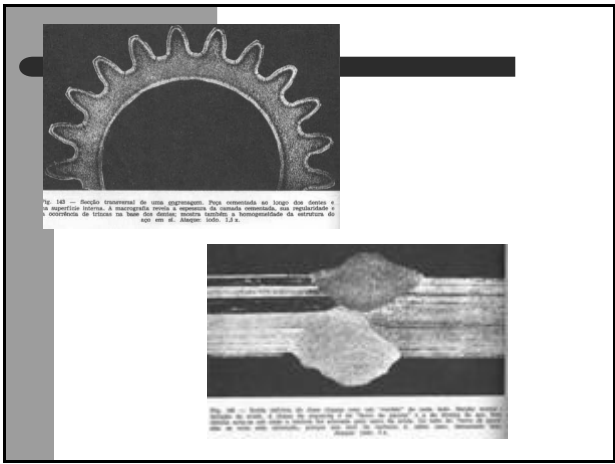
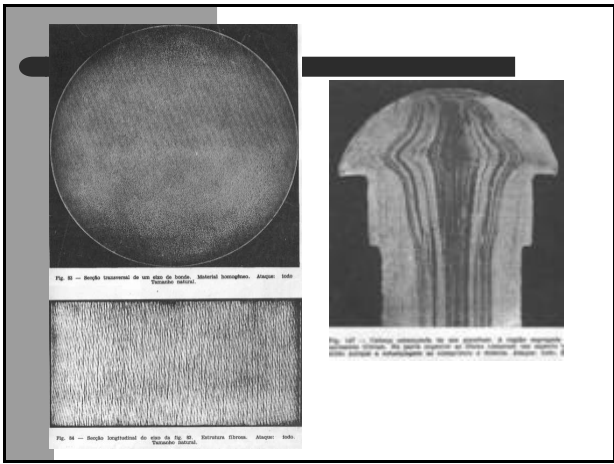


Fig. 17 - Barra de aço. Seção transversal. Segregação que ocorreu. As linhas que se abrem em locais, partindo dos vértices da segregação, mostram que a barra foi produzida por laminação em frio e não por laminação a quente. Ataque: iodo. Tamanho natural.



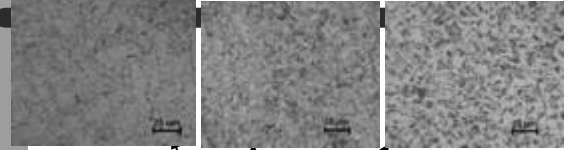
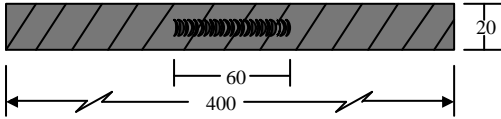
PGMAT **Técnicas Experimentais em Ciências dos Materiais**
 CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS Prof^ª. Ingeborg Kühn

ENSAIO METALOGRÁFICO
MACROGRAFIA E MICROGRAFIA

_____ Hélio Ormeu Ribeiro

EXEMPLOS PRÁTICOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA

CORPO DE PROVA SOLDAGEM DE SIMPLES DEPOSIÇÃO NO VERGALHÃO DE AÇO CA 50

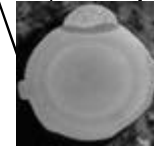


b) Ferrita (≈ 20%) / Perлита (≈ 30%)
Bainita (≈ 15%) / Martensita (≈ 35%) Dureza = 275 HV

c) Ferrita (≈ 50%) / Perлита (≈ 45%)
Bainita (≈ 5%) Dureza = 225 HV

d) Ferrita (≈ 70%) / Perлита (≈ 30%)
Dureza = 200 HV

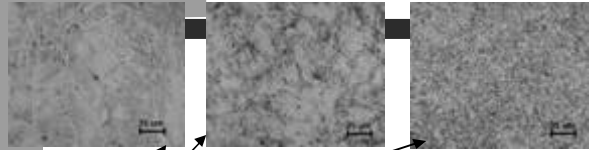
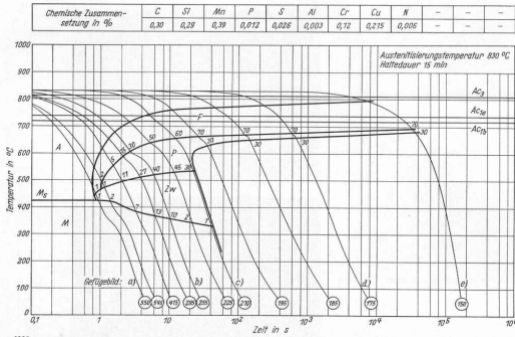
a) Macrografia com diferentes zonas de resfriamento



10mm

CURVA DE RESERMIAMENTO CONTINUO

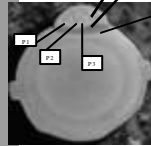
Aço ck 15-0,3%C (similar ao CA50)



b) Ferrita de contorno de grão e em placas
Bainita (≈ 15%) / Martensita (≈ 60%) Dureza = 270 HV

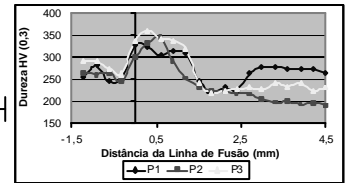
c) Ferrita (≈ 8%) / Perлита (≈ 17%)
Bainita (≈ 15%) / Martensita (≈ 60%) Dureza = 340 HV

d) Ferrita (≈ 50%) / Perлита (≈ 45%)
Bainita (≈ 5%) Dureza = 225 HV

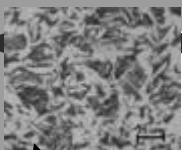


10mm

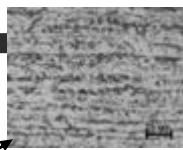
a) Macrografia da solda do Cp crítico



Perfil de dureza



a) Ferrita (≈ 60%) / Perлита (≈ 40%)
Dureza = 210 HV

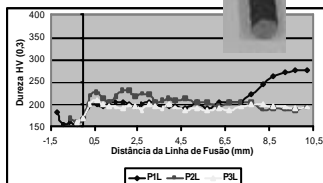


b) Ferrita (≈ 60%) / Perлита (≈ 40%)
Dureza = 210 HV



c) macrografia da região soldada do corpo de prova de referência

4mm



Perfil de dureza