LFS

PME 3430

Materiais para Construção Mecânica

Profs. Drs.: Newton K. Fukumasu, Deniol K. Tanaka & Amilton Sinatora

Referências:

CALLISTER, William D., *Materials science and engineering: an introduction*. 8ed. New York: John Wiley, 2009. 122p. ISBN-13: 978-0-471-73696-7

MEYERS, M. A. & Chawla K. K. Mechanical Behavior of Materials. Prentice Hall, 1999, 680. ISBN 0-13-262817-1 2

newton.fukumasu@usp.br

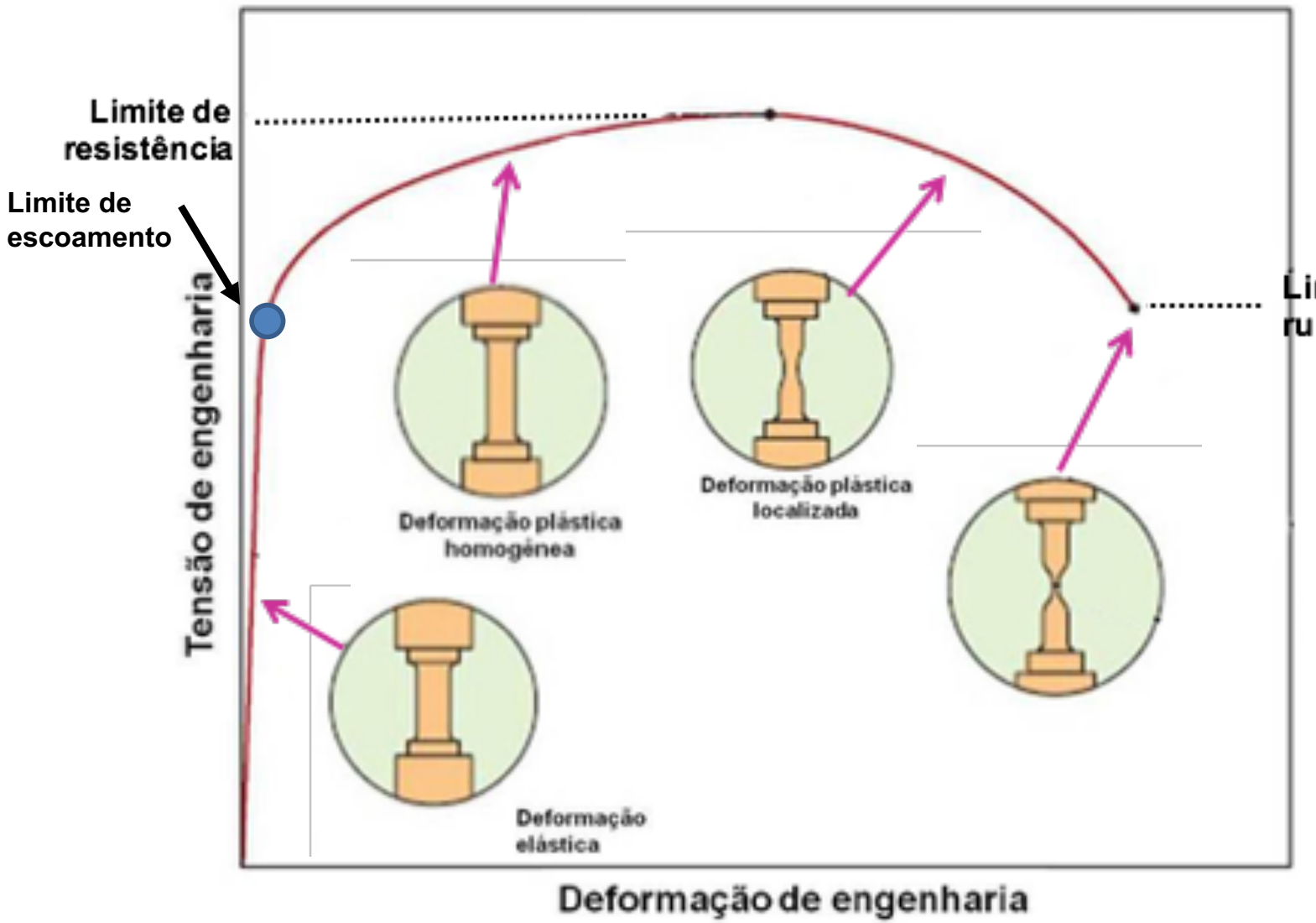
Cronograma de Atividades – 1º Semestre 2017
Proposta – 2

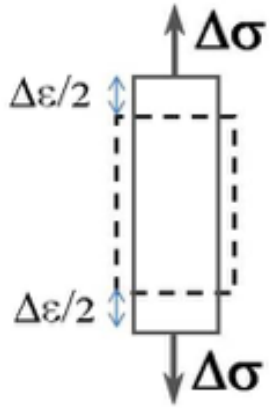
Aula	Data	Tópico do Programa
01	08/03	Apresentação da disciplina, critérios de avaliação e revisão de conceitos
02	15/03	Definição dos temas de trabalho e revisão de conceitos
03	22/03	Processamento de ligas metálicas (fundição)
04	29/03	Processamento de ligas metálicas (laminação e forjamento)
05	05/04	Tratamento térmico de ligas metálicas (diagrama TTT)
-	12/04	SEMANA SANTA – Não haverá aula
06	19/04	Tratamento de superfícies de ligas metálicas (químico e mecânico)
07	26/04	Processamento de polímeros (polimerização, borrachas e vulcanização)
08	03/05	Polímeros avançados (vítreos, piezos)
09	10/05	PROVA – P1 e entrega de TRABALHOS – T1
10	17/05	Processamento de cerâmicas (fundição e sinterização)
11	24/05	Processamento de cerâmicas (tratamento térmico)
12	31/05	Cerâmicas avançadas (piezos e termo-elétricos)
13	07/06	Recobrimentos cerâmicos (carbonetos, nitretos, óxidos)
14	14/06	Compósitos metal/cerâmicos (ferramentaria)
15	21/06	Compósitos polímero/cerâmicos (fibras de carbono, aramida)
16	28/06	Entrega de TRABALHOS – T2
17	05/07	PROVA – P2
18	07/07	PROVA Substitutiva

newton.fukumasu@usp.br

Propriedades mecânicas

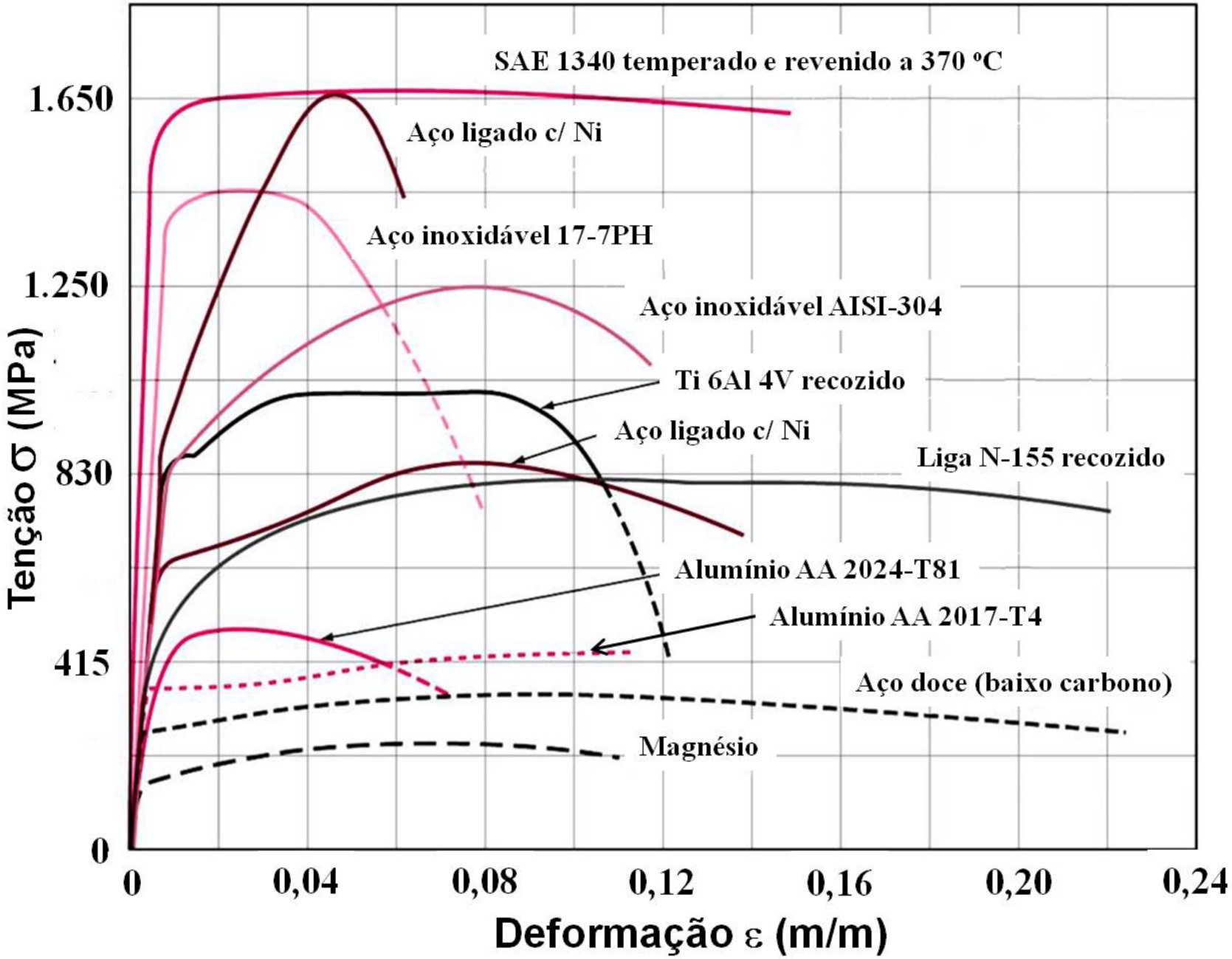
❖ **Curva Tensão x Deformação**





newton.fukumasu@usp.br

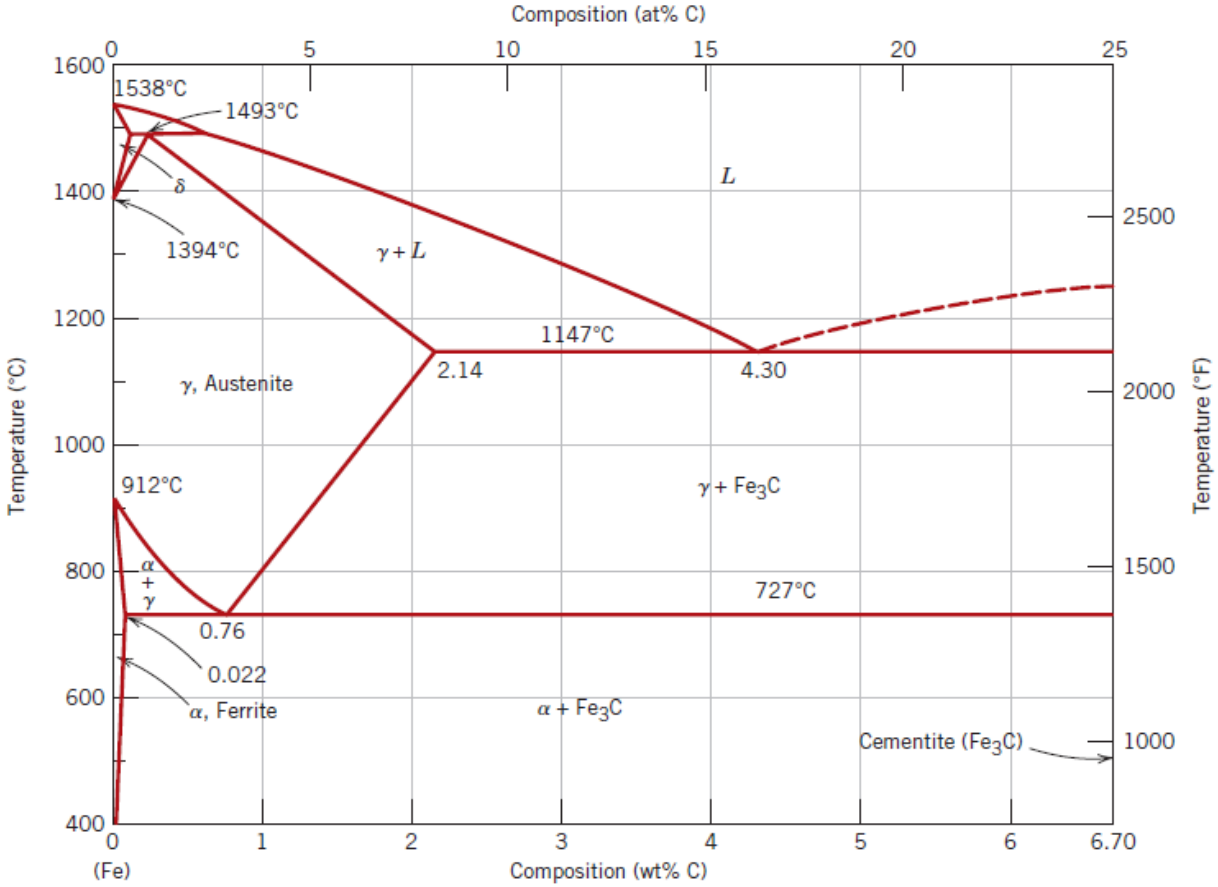
Curva tensão X deformação de metais



newton.fukumasu@usp.br

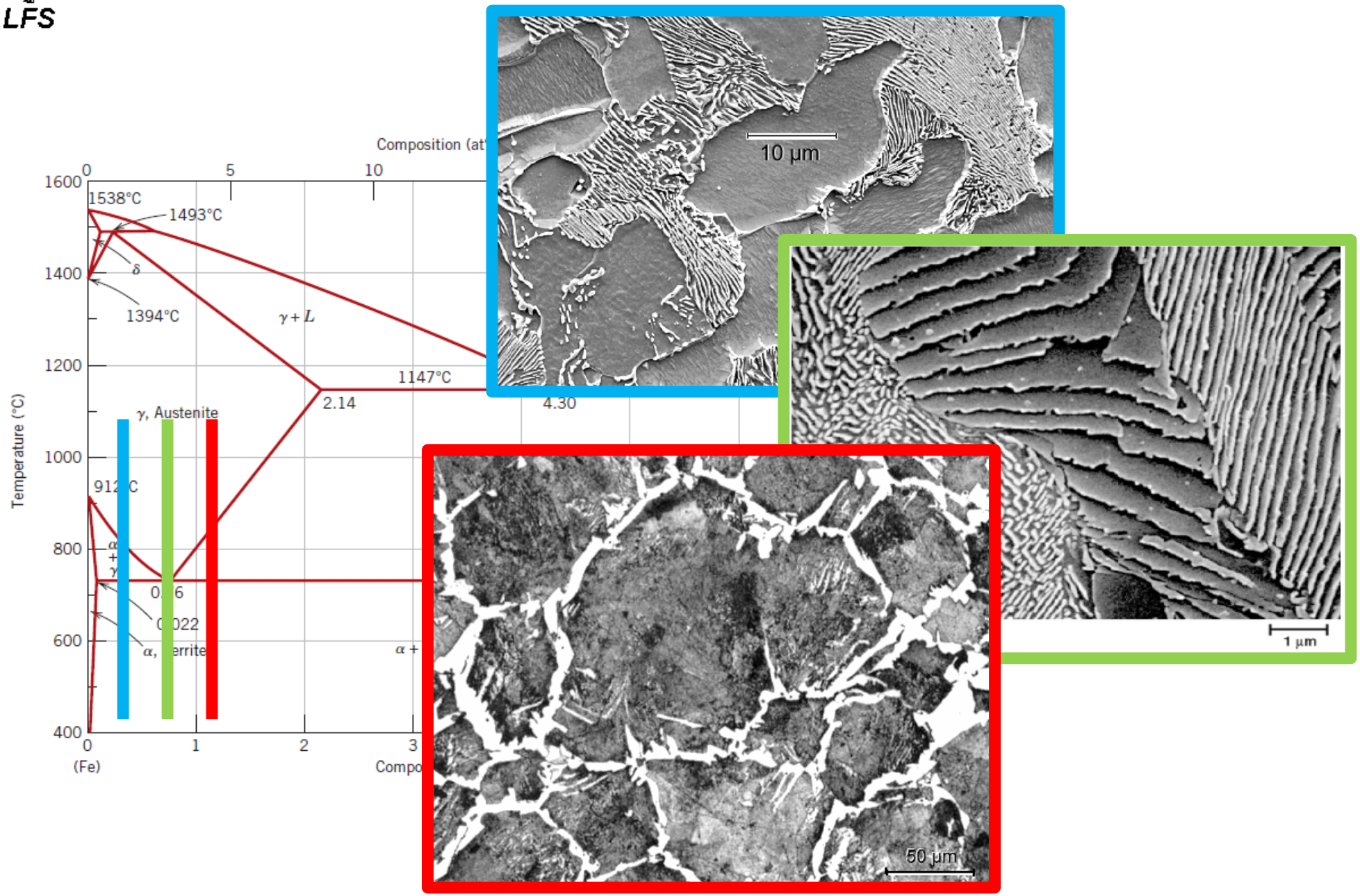
Diagrama de fases – Ferro X Carbono

- Aços
  - (C < 2%)
- Ferros fundidos
  - (2% < C > 6.7%)
- Tipos de microestrutura
  - Ferrita (α)
  - Austenita (γ)
  - Ferrita (δ)
  - Cementita (Fe_3C)



newton.fukumasu@usp.br

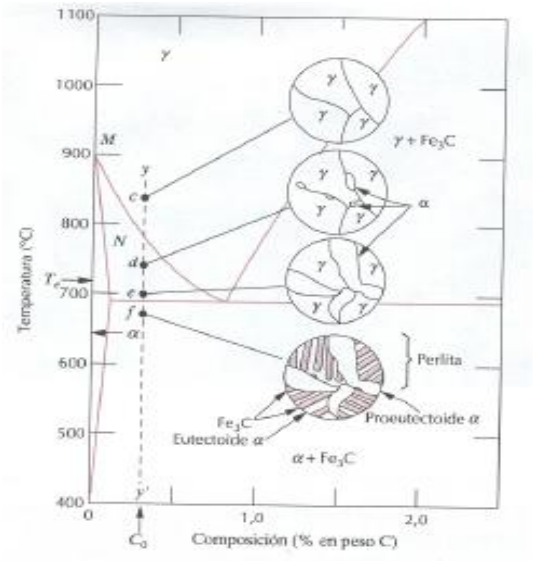
Sistema Ferro X Carbono – Aços

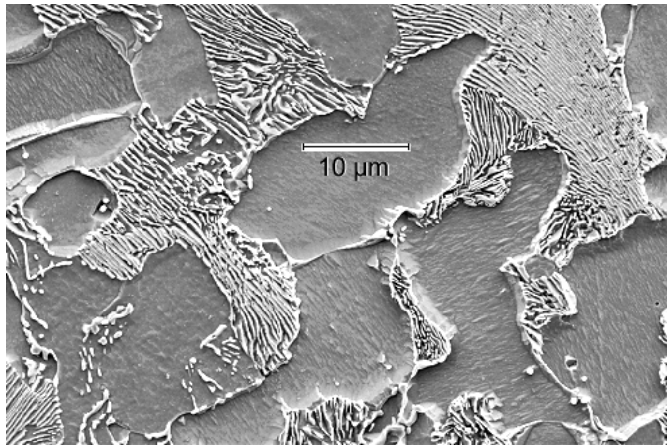


newton.fukumasu@usp.br

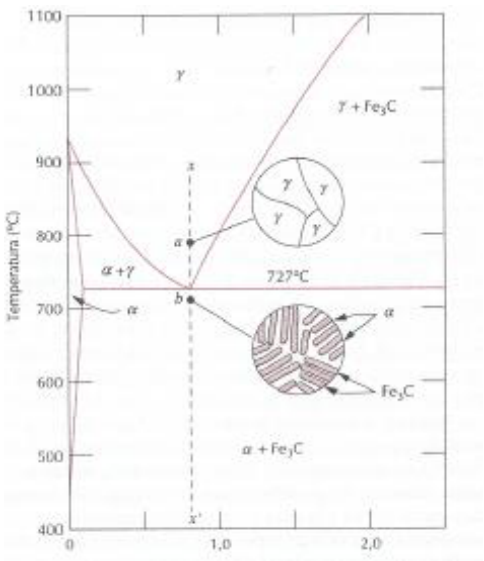
Sistema Ferro X Carbono – Aços

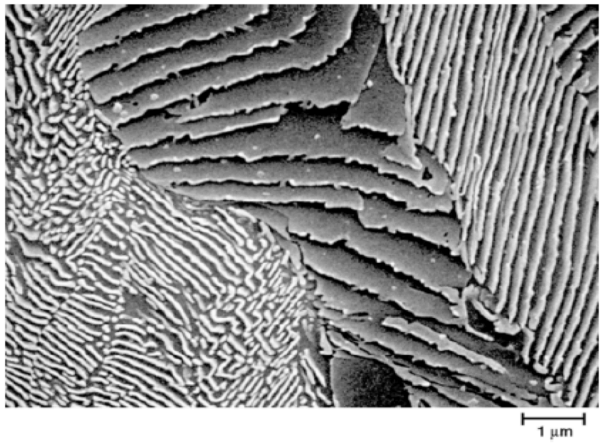
Aço hipo-eutetóide



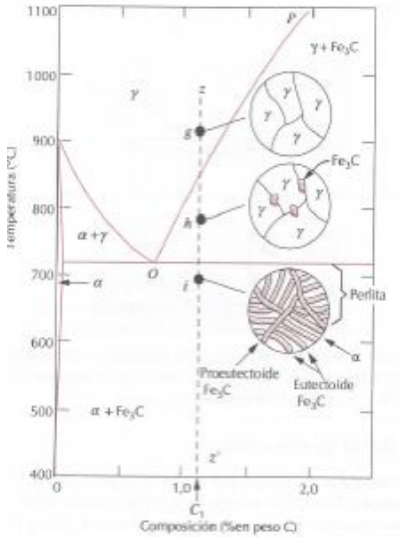


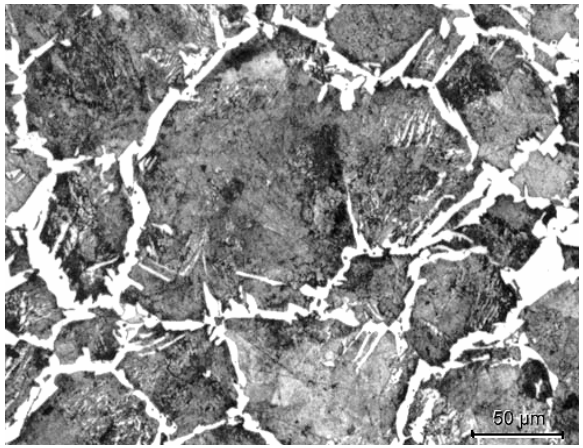
Aço eutetóide





Aço hiper-eutetóide





https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_7/backbone/r7_2_1.html

newton.fukumasu@usp.br

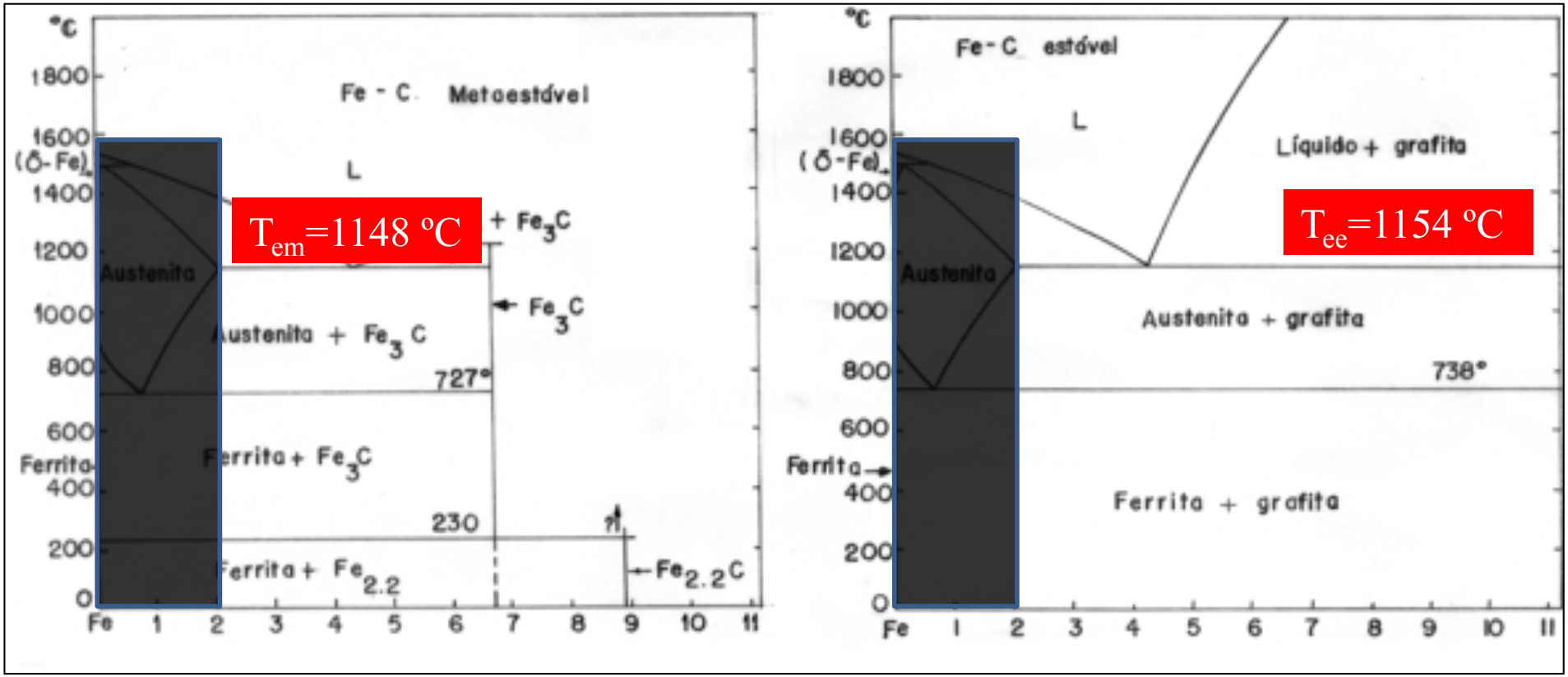
Usos dos Aços

Aços carbono

Baixo carbono (%C<0,3)	Médio carbono (0,3<%C<0,7)	Alto carbono (%C>0,7)
• Grande ductilidade • Bom para trabalho mecânico e soldagem • Utilizado em pontes, edifícios, navios, caldeiras, peças de grandes dimensões • Não temperáveis	• Temperáveis • Boa tenacidade e resistência • Utilizado em engrenagens, bielas e carris	• Temperáveis • Elevada dureza e resistência • Utilizado em ferramentas, componentes agrícolas, molas e engrenagens

newton.fukumasu@usp.br

Sistema Ferro X Carbono – Ferro Fundido

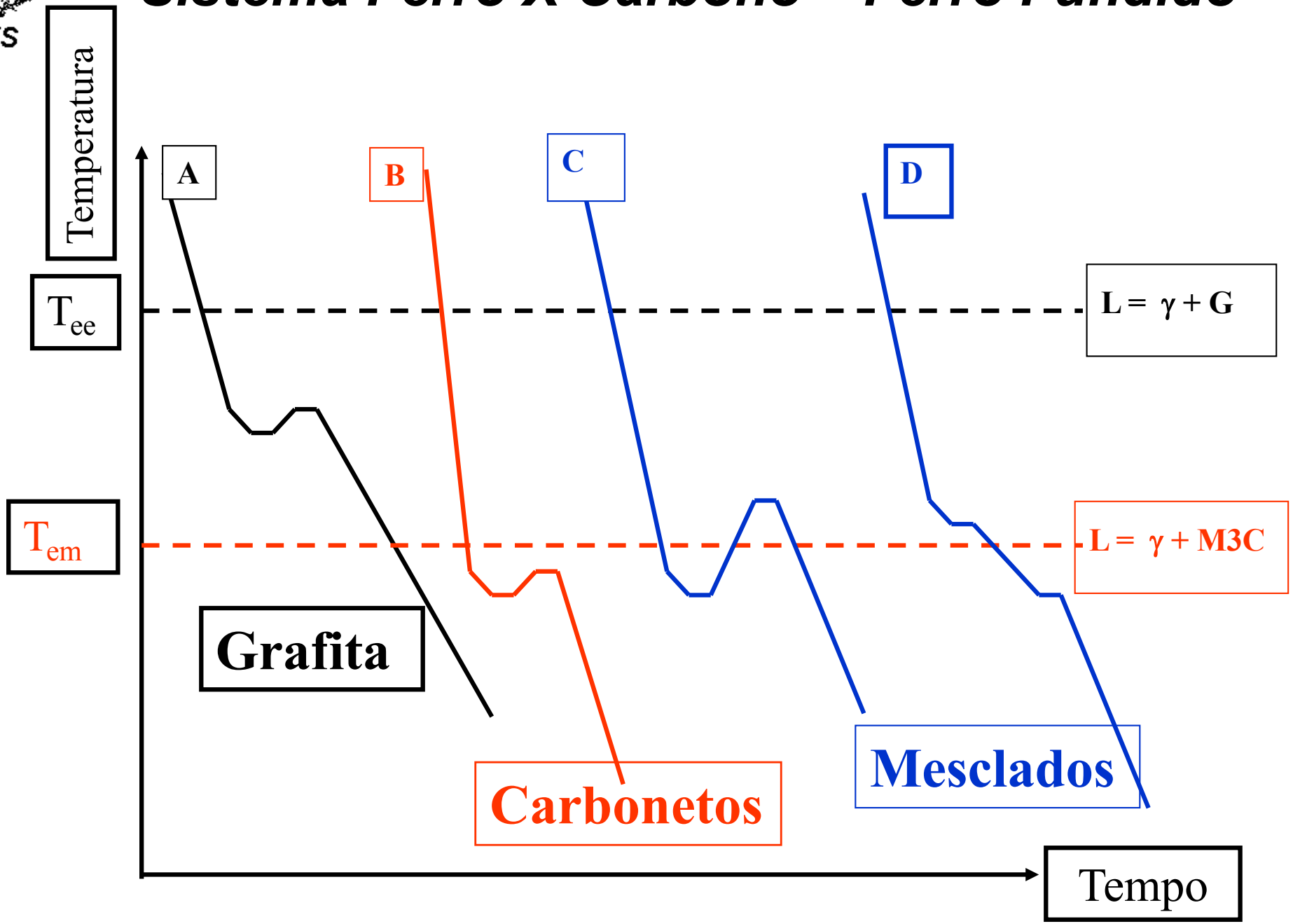


Formação de Cementita (Fe_3C)

Formação de Grafita (C)

newton.fukumasu@usp.br

Sistema Ferro X Carbono – Ferro Fundido



newton.fukumasu@usp.br

Sistema Ferro X Carbono – Ferro Fundido

Ferro Fundido

Metaestável

- Formação de carbonetos M_3C
  - F.F. Branco
  - F.F. Coquilhado
- Formação de cabonetos M_7C_3
  - F.F. branco alto Cromo

Estável

- Formação de grafita
  - Veios
    - F.F. Cinzento
  - Nódulos
    - Nodular ou esferoidal
  - Compacta
    - Vermiculas

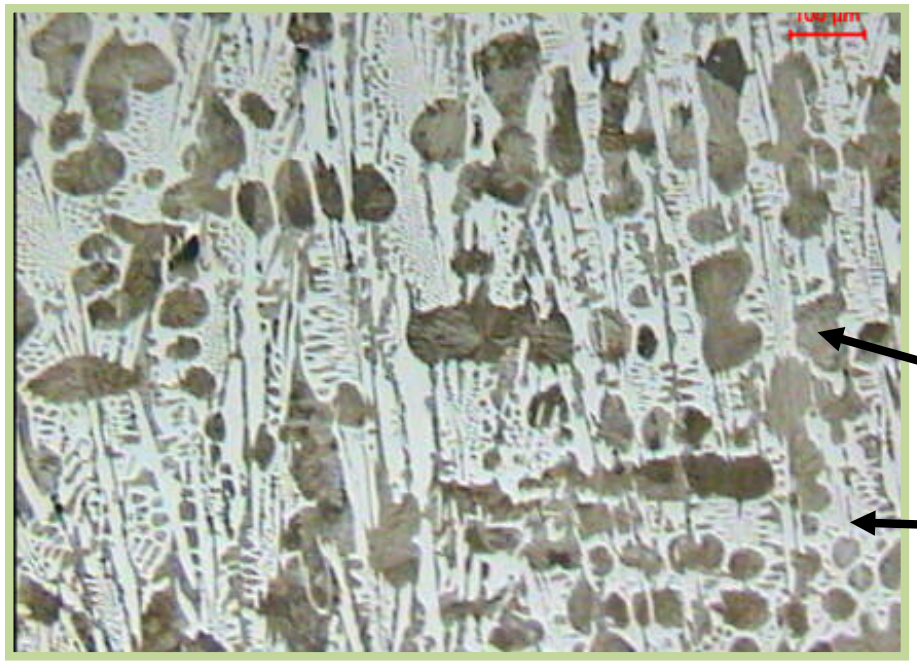
Mesclado entre Carbonetos e Grafita

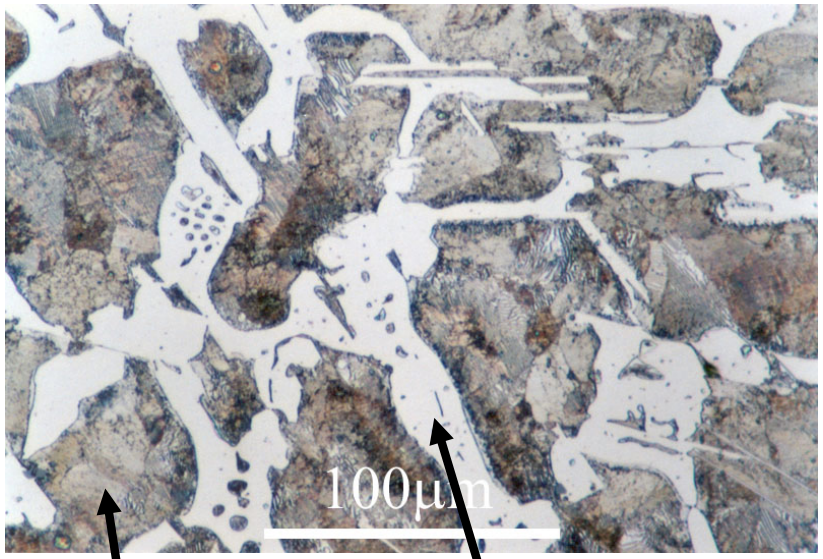
newton.fukumasu@usp.br

Ferro Fundido – Carboneto

Carbonetos M_3C

Ferro fundido branco





Perlita

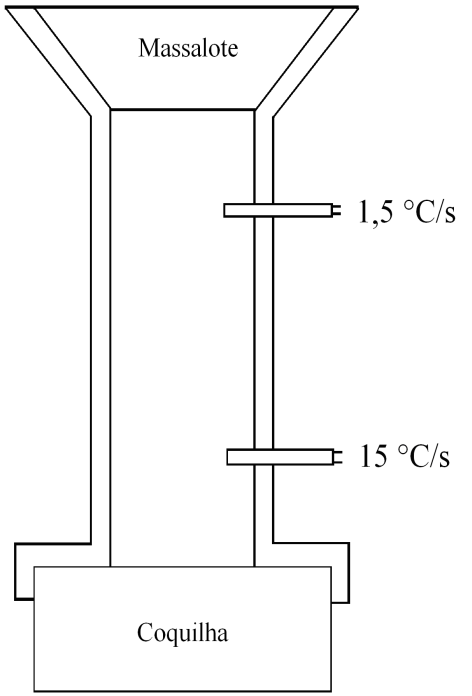
Cementita + Ferrita

newton.fukumasu@usp.br

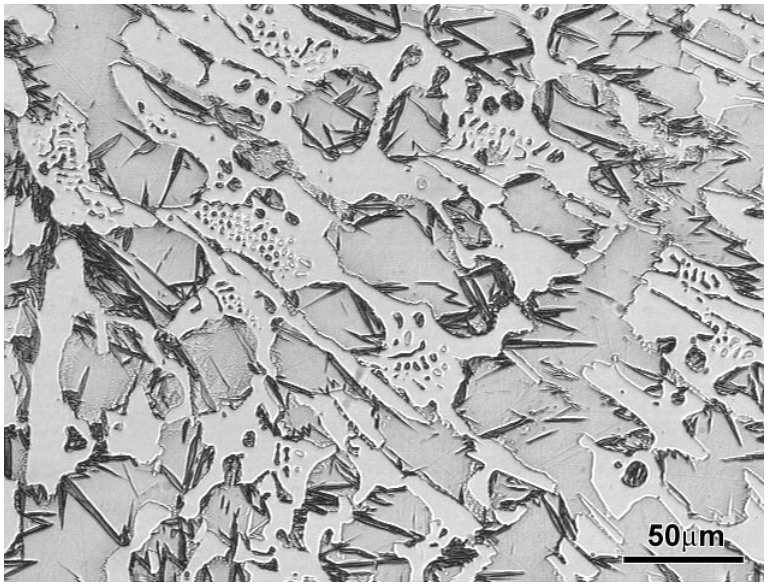
Ferro Fundido – Carboneto

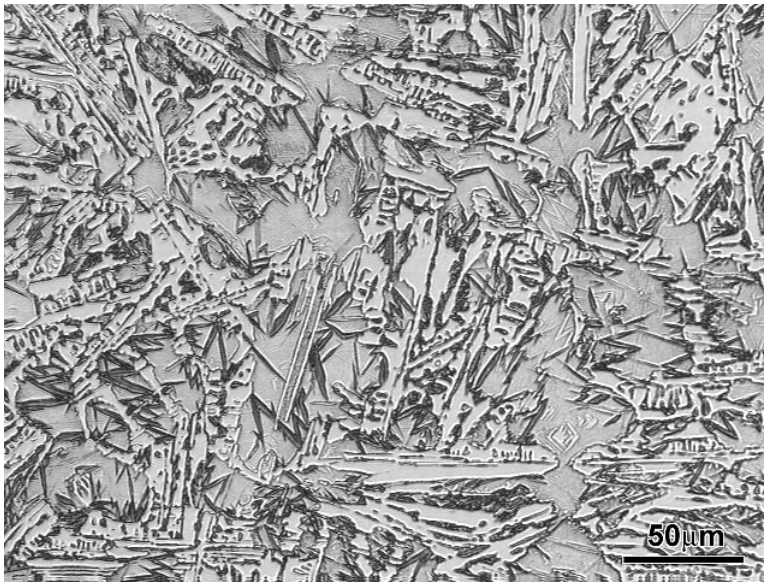
Carbonetos M_3C

Ferro fundido coquilhado



Coronado 2009

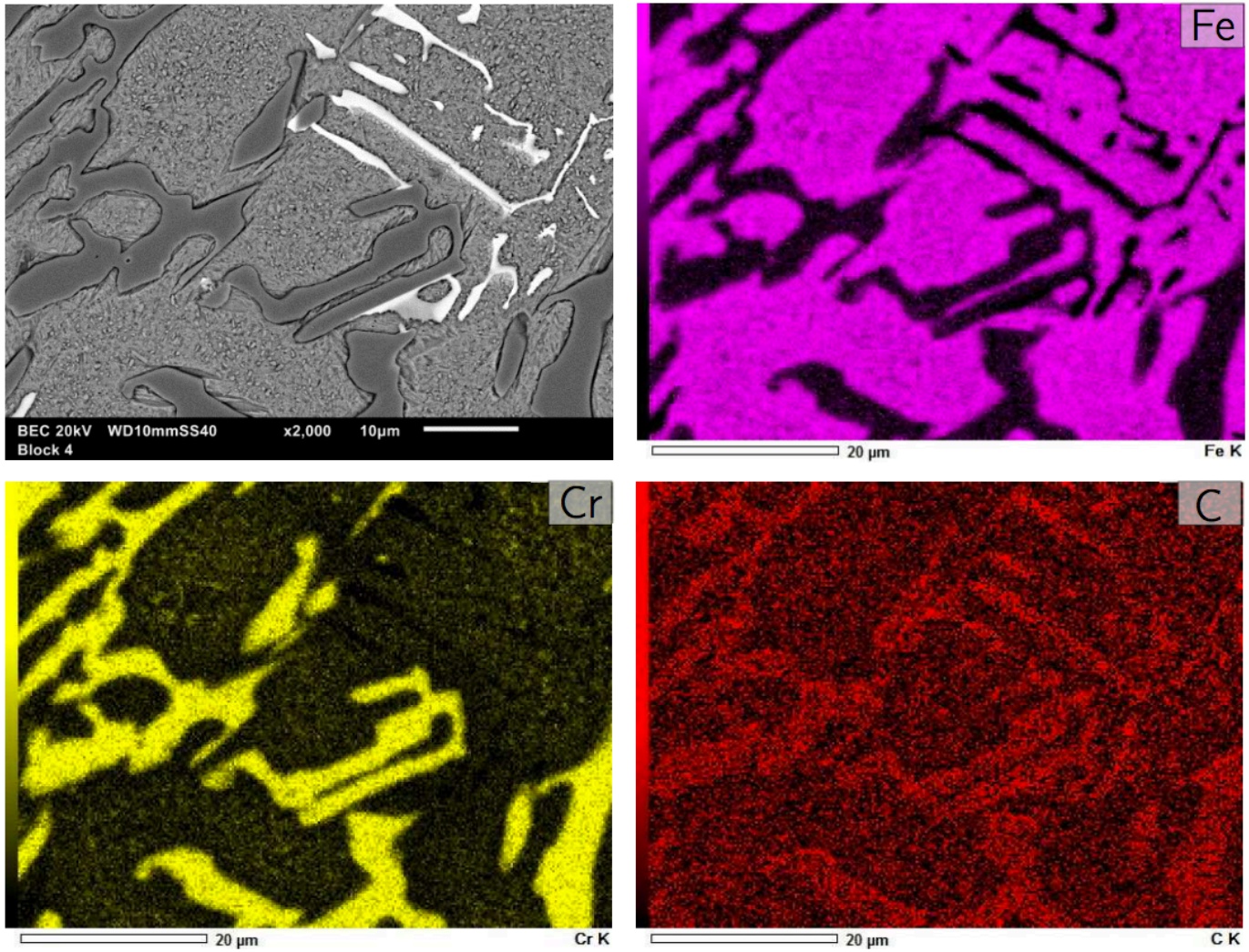




newton.fukumasu@usp.br

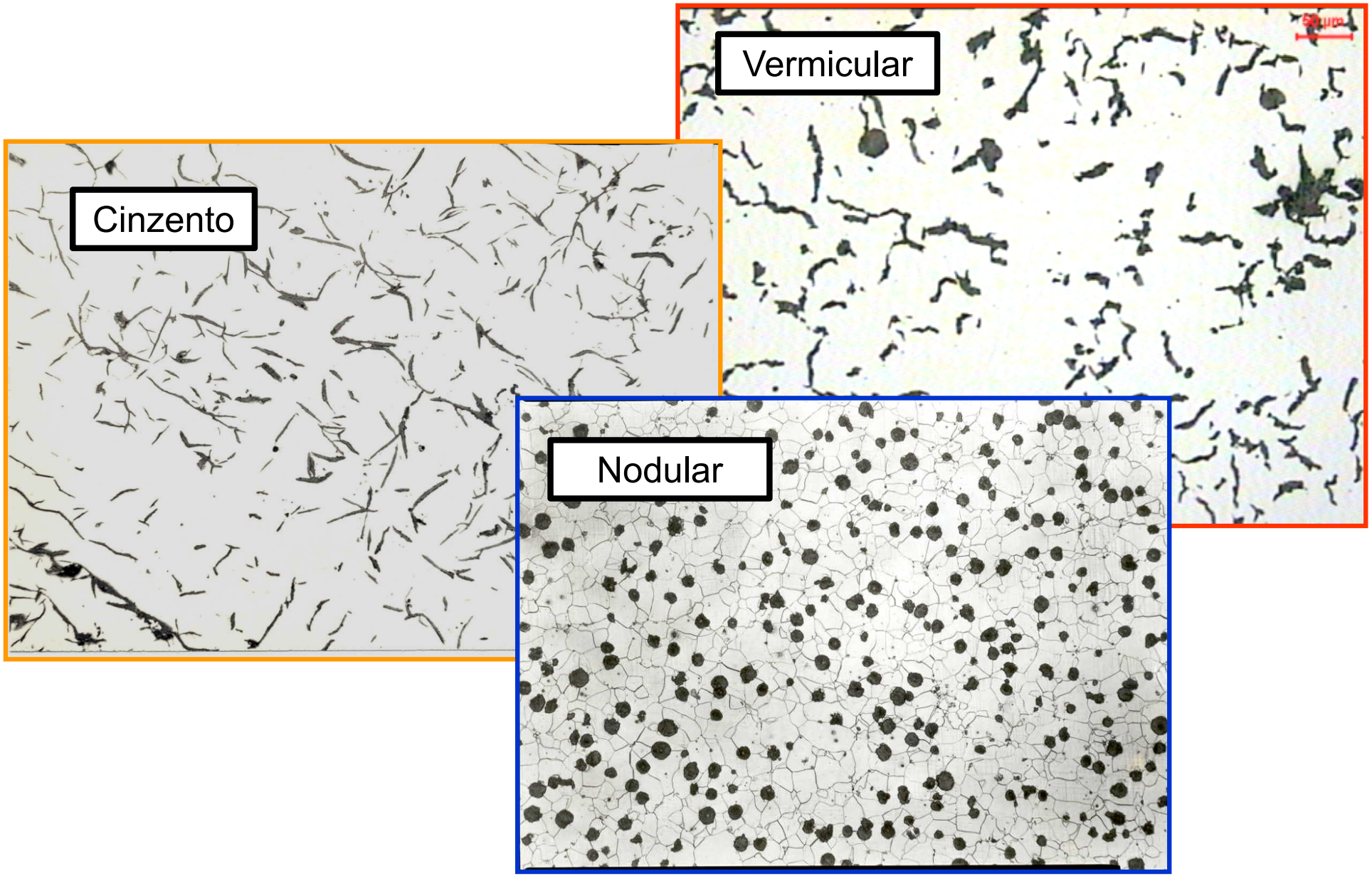
Ferro Fundido – Carboneto

Carbonetos M_7C_3 - ***Ferro fundido branco alto cromo***



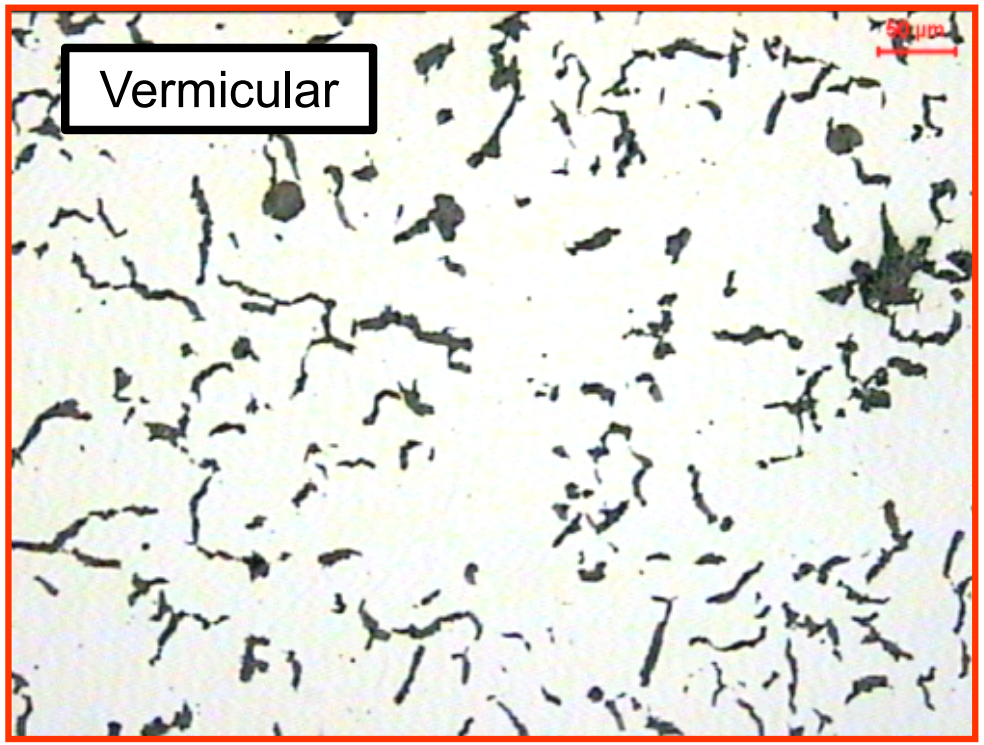
newton.fukumasu@usp.br

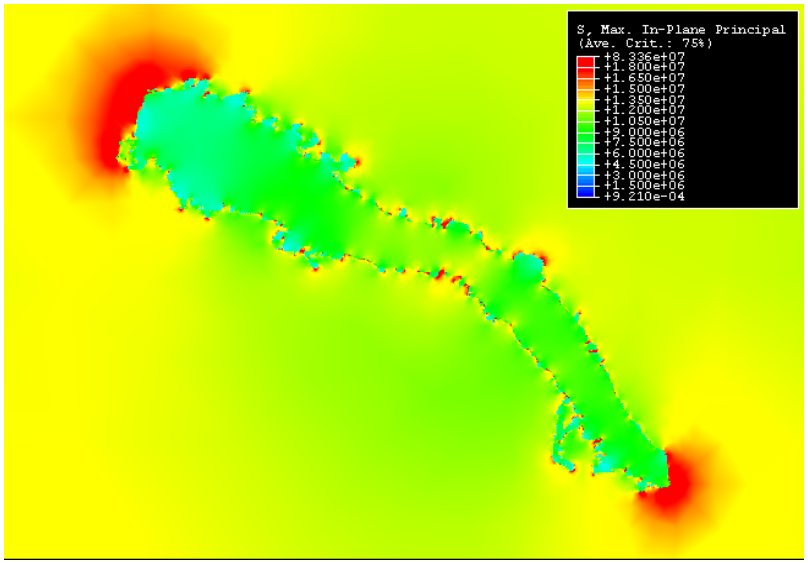
Ferro Fundido – Grafita



newton.fukumasu@usp.br

Ferro Fundido – Grafita





$$\sigma_{ponta} = k\sigma_{longe}\frac{L}{D}$$

Cinzento

Vermicular

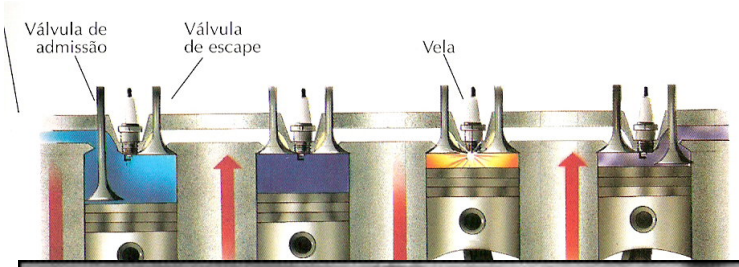
Nodular

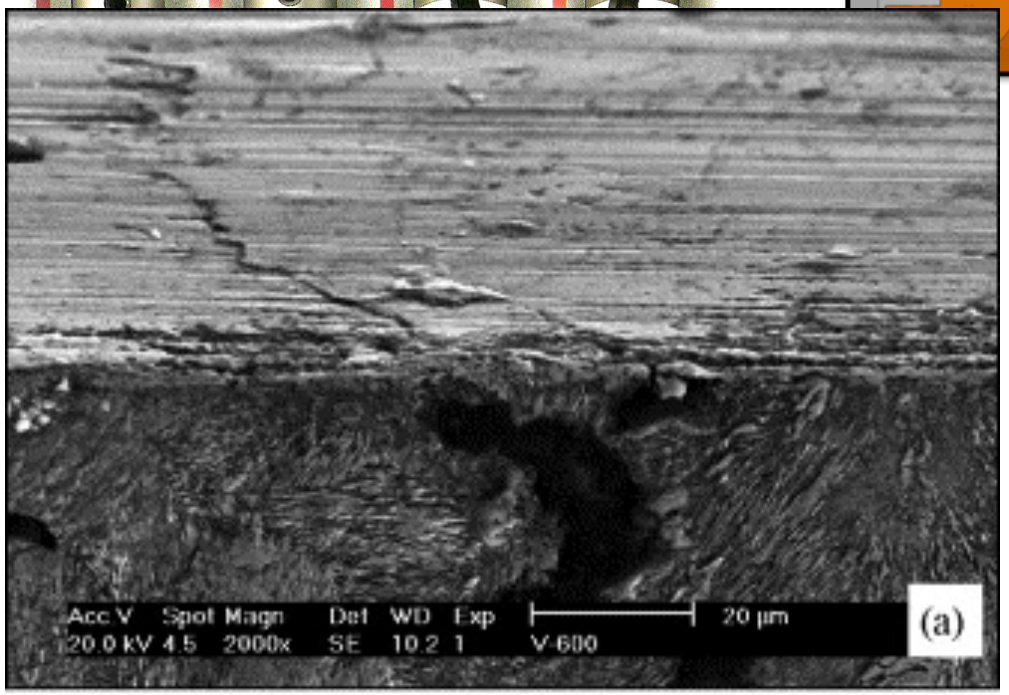
Paula Pelegrino & Newton Fukumatsu - Análise da distribuição das tensões na microestrutura durante o desgaste por cavitação em ferro fundido vermicular. ABM 2004

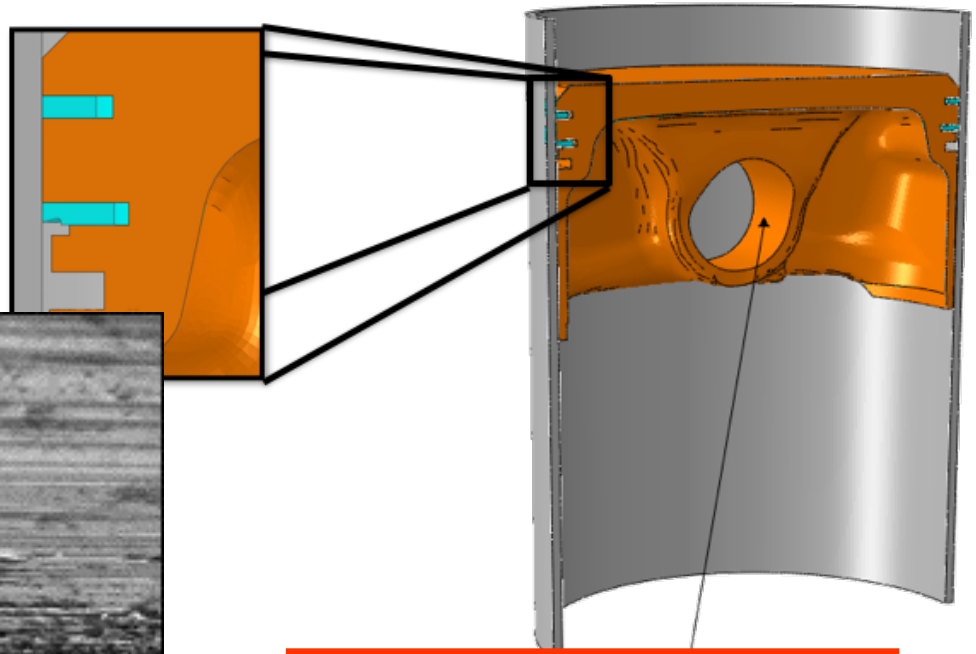
newton.fukumasu@usp.br

Ferro Fundido – Grafita

- **Aplicação na camisa do motor**





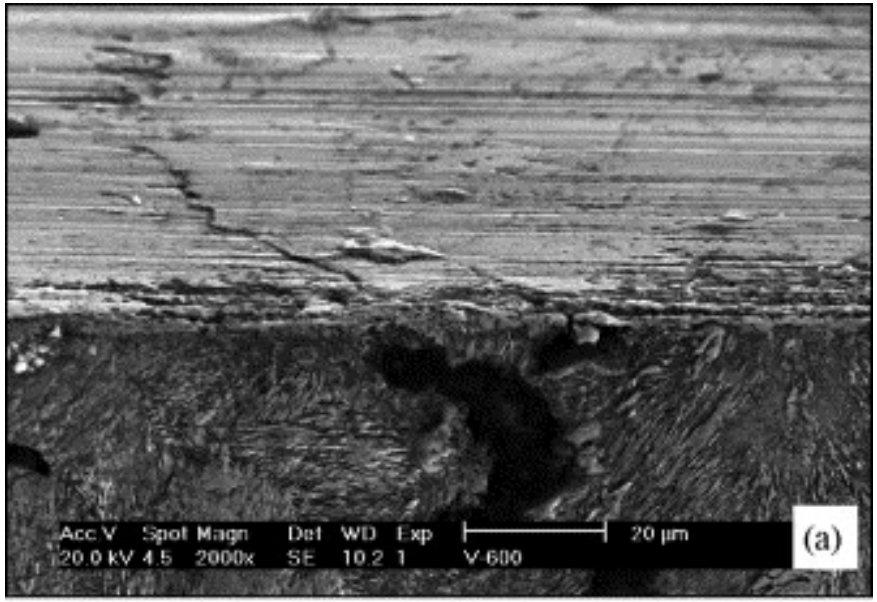


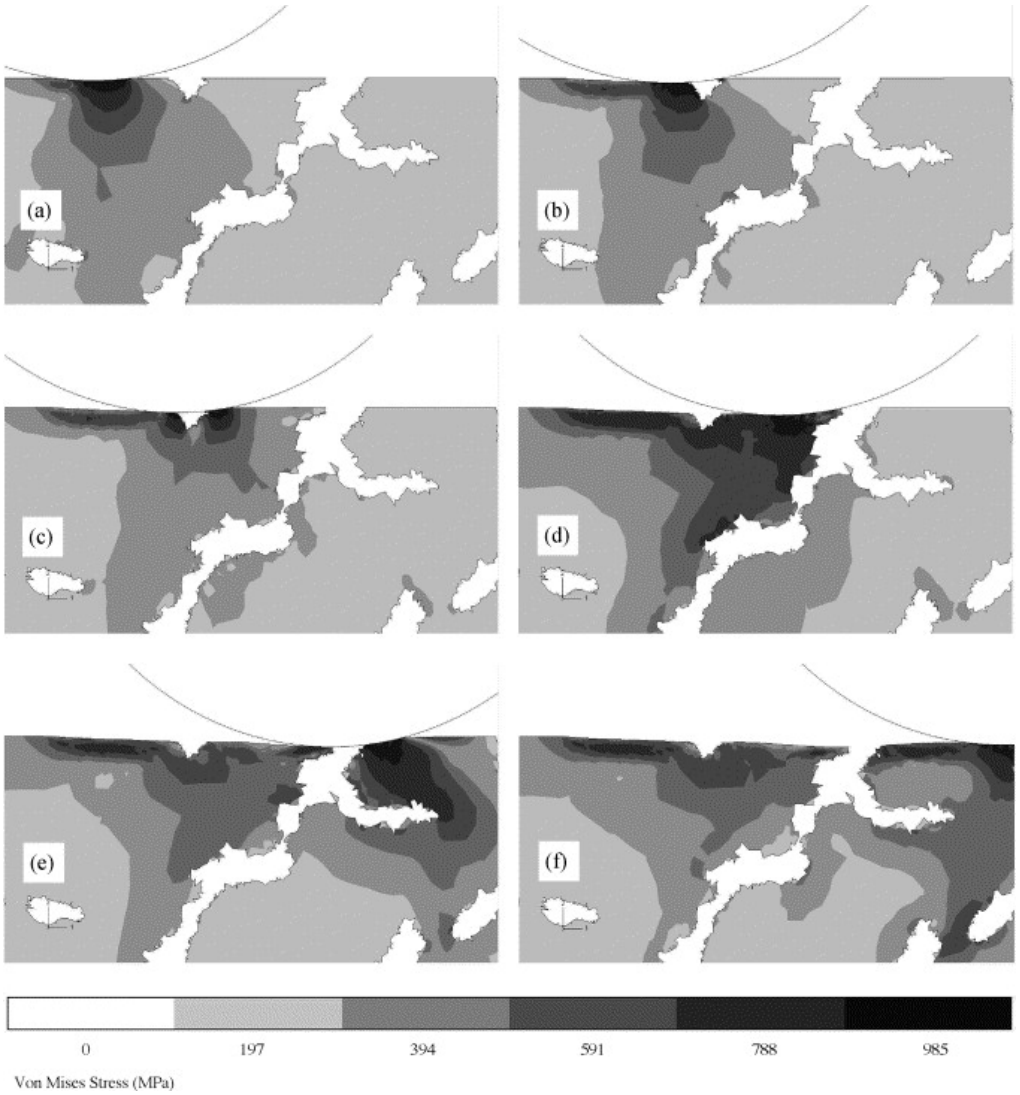
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164805000359

newton.fukumasu@usp.br

Ferro Fundido – Grafita

- Aplicação na camisa do motor



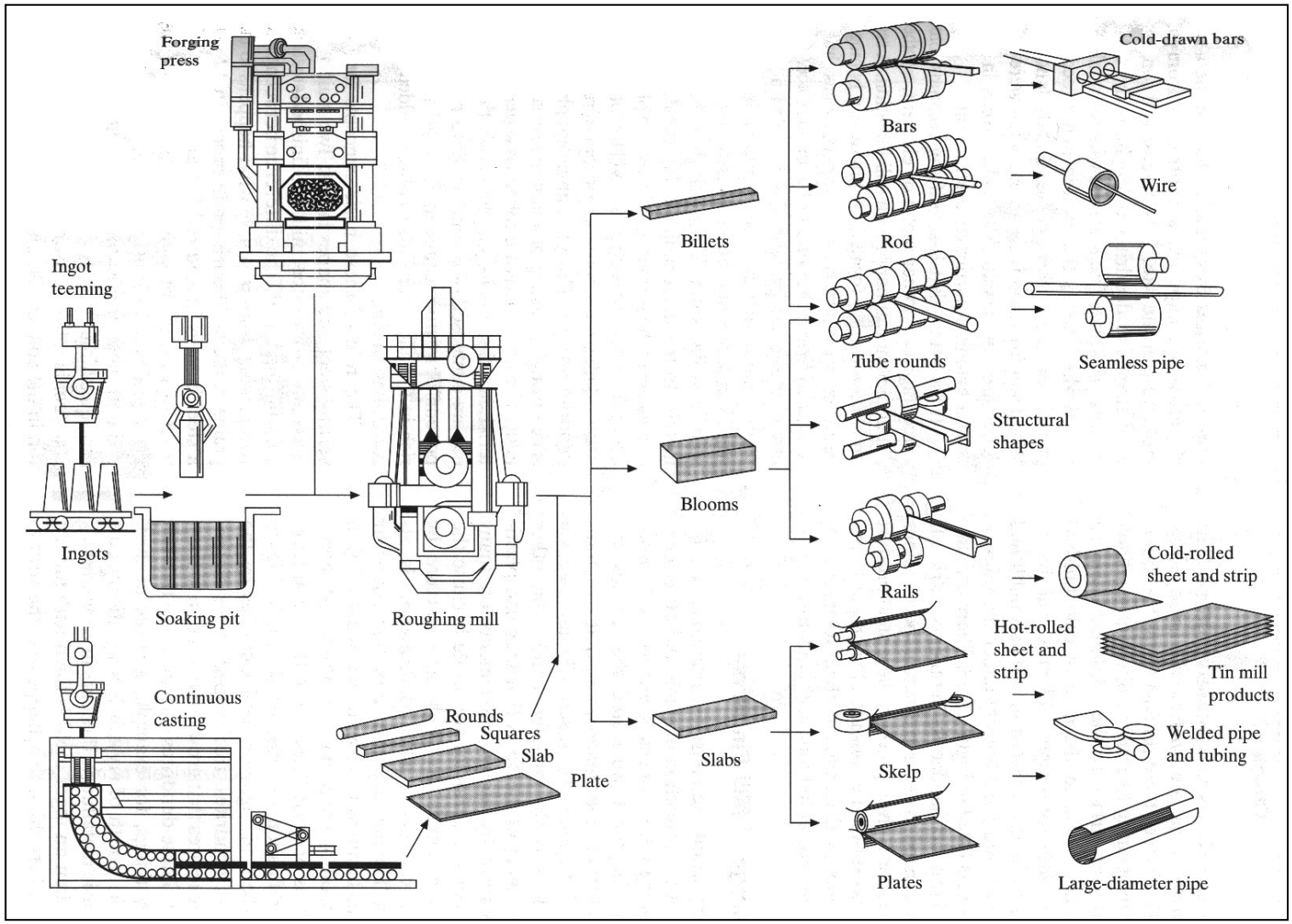


http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164805000359

newton.fukumasu@usp.br

Processos siderúrgicos

- **Fundição**
- Laminação
- Forjamento

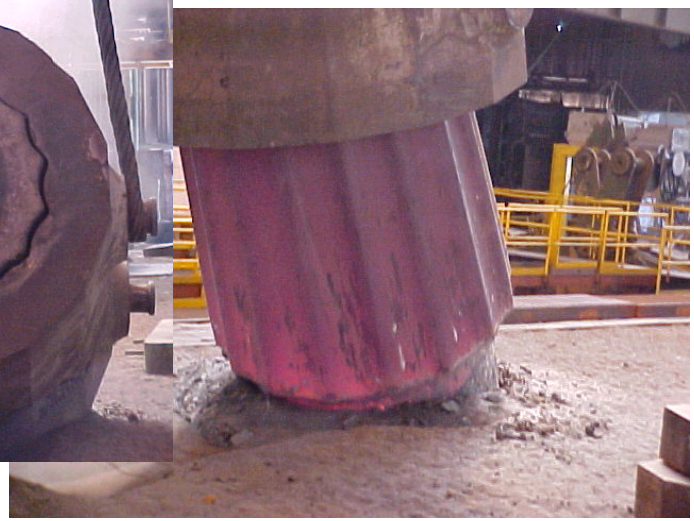


newton.fukumasu@usp.br

Processo de fundição

newton.fukumasu@usp.br

Processo de fundição



newton.fukumasu@usp.br

Nomeclatura dos aços

Numerals and digits[a]	Type of steel and nominal alloy content[b]
Carbon Steels	
10XX(a)	Plain carbon (Mn 1.00% max)
11XX	Resulfurized
12XX	Resulfurized and rephosphorized
15XX	Plain carbon (max Mn range—1.00 to 1.65%)
	Manganese Steels
13XX	Mn 1.75
	Nickel Steels
23XX	Ni 3.50
25XX	Ni 5.00
	Nickel–Chromium Steels
31XX	Ni 1.25; Cr 0.65 and 0.80
32XX	Ni 1.75; Cr 1.07
33XX	Ni 3.50; Cr 1.50 and 1.57
34XX	Ni 3.00; Cr 0.77
	Molybdenum Steels
40XX	Mo 0.20 and 0.25
44XX	Mo 0.40 and 0.52
	Chromium–Molybdenum Steels
41XX	Cr 0.50, 0.80, and 0.95; Mo 0.12, 0.20, 0.25, and 0.30
	Nickel–Chromium–Molybdenum Steels
43XX	Ni 1.82; Cr 0.50 and 0.80; Mo 0.25
43BVXX	Ni 1.82; Cr 0.50; Mo 0.12 and 0.25; V 0.03 min
47XX	Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20 and 0.35
81XX	Ni 0.30; Cr 0.40; Mo 0.12
86XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20
87XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.25
88XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35
93XX	Ni 3.25; Cr 1.20; Mo 0.12
94XX	Ni 0.45; Cr 0.40; Mo 0.12
97XX	Ni 0.55; Cr 0.20; Mo 0.20
98XX	Ni 1.00; Cr 0.80; Mo 0.25
	Nickel–Molybdenum Steels
46XX	Ni 0.85 and 1.82; Mo 0.20 and 0.25
48XX	Ni 3.50; Mo 0.25
	Chromium Steels
50XX	Cr 0.27, 0.40, 0.50, and 0.65
51XX	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00, and 1.05
	Chromium Steels
50XXX	Cr 0.50
51XXX	Cr 1.02 } C 1.00 min
52XXX	Cr 1.45
	Chromium–Vanadium Steels
61XX	Cr 0.60, 0.80. and 0.95; V 0.10 and 0.15 min
	Tungsten–Chromium Steel
72XX	W 1.75; Cr 0.75
	Silicon–Manganese Steels
92XX	Si 1.40 and 2.00; Mn 0.65, 0.82, and 0.85; Cr 0.00 and 0.65
	High-Strength Low-Alloy Steels
9XX	Various SAE grades
	Boron Steels
XXBXX	B denotes boron steel
	Leaded Steels
XXLXX	L denotes leaded steel

Source: *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 1, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978.

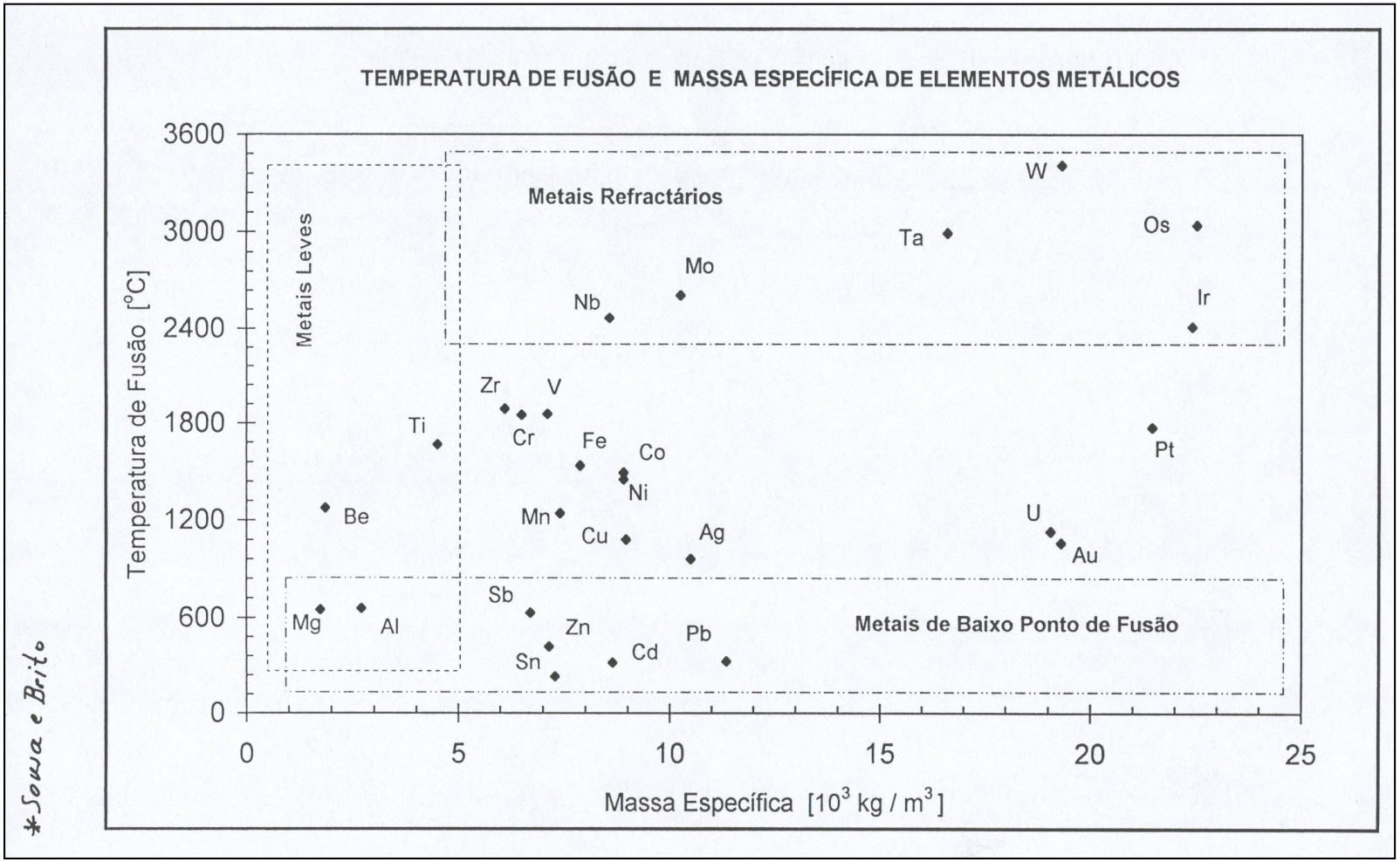
[a] XX or XXX in the last two or three digits of these designations indicates that the carbon content (in hundredths of a weight percent) is to be inserted.

[b] All alloy contents are expressed in weight percent.

newton.fukumasu@usp.br

Ligas metálicas e precipitados

❖ **Ligas**



newton.fukumasu@usp.br

Ligas metálicas e precipitados

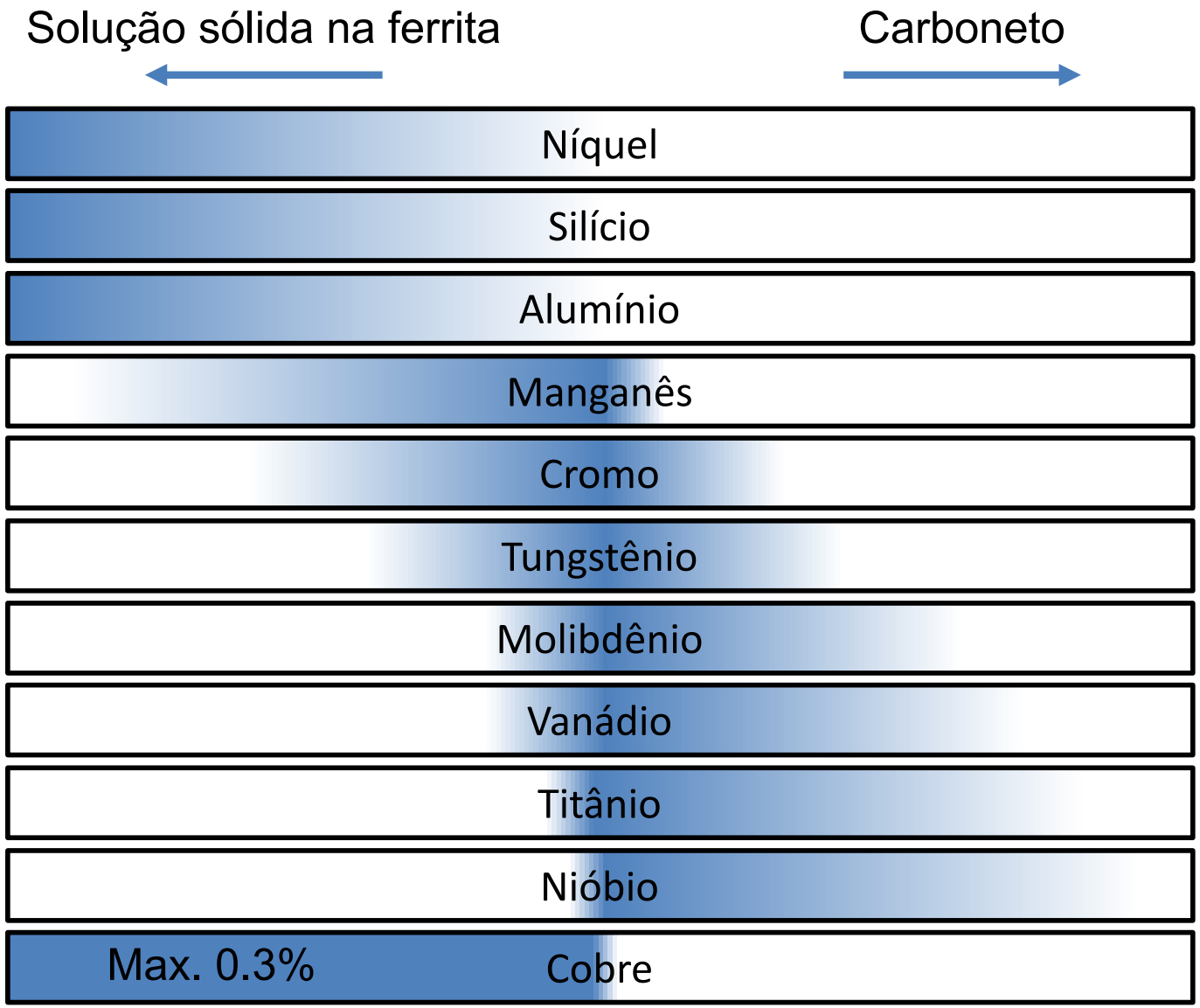
- Elementos de liga são utilizadas para obter certas propriedades e características:
  - **Melhoria de propriedades mecânicas**
  - **Melhoria da temperabilidade**
  - **Maior usinabilidade, resistência ao desgaste e à fadiga**
  - **Melhoria de resistência à corrosão e oxidação**
  - **Melhoria de propriedades mecânicas a baixas e/ou altas temperaturas**

- Ligas de Ferro
  - **Si, Ni, Nb, Cr, Mo, Mn, V, W, Ti, Al**

- Ligas de Alumínio
  - **Si**

newton.fukumasu@usp.br

Ligas metálicas e precipitados



newton.fukumasu@usp.br

Ligas metálicas e precipitados

	Sol. Matriz	Carboneto	Tam. Grão	Tenacidade	Lim. Elást.	Res. Tração	Res. Desgaste	Res. Corr.	Res. Quente	Cond. Elétrica	Cond. Térmica
Si											
Mn											
Cr	%	%									
Ni											
V											
W											
Co			🔒								
Mb			🔒								

Aumenta

Diminui

newton.fukumasu@usp.br

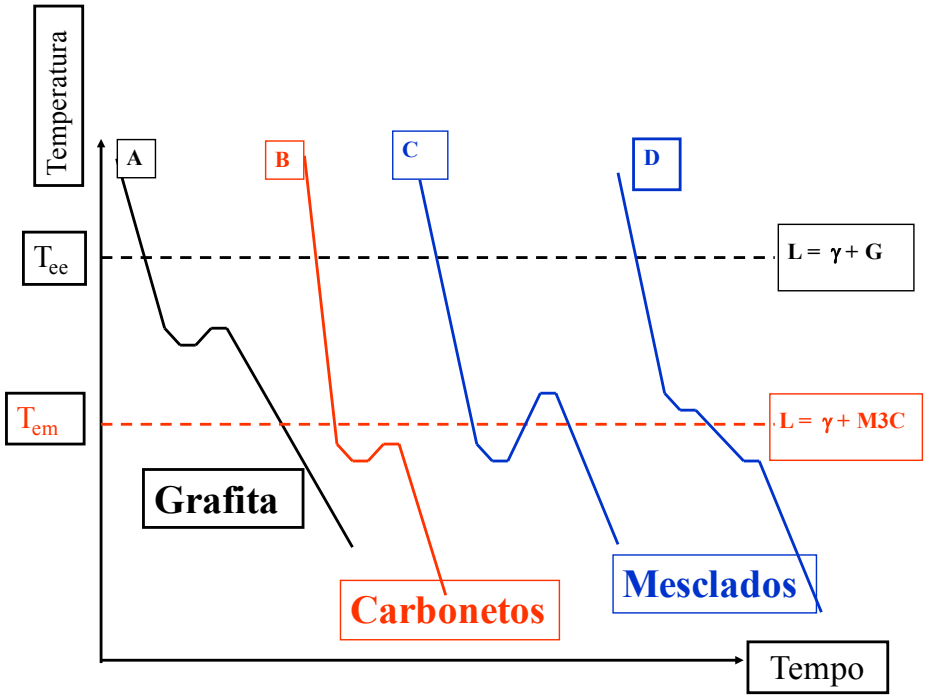
Ligas metálicas e precipitados

- Carbono equivalente em ferros fundidos
  - Adição de **silício** aumenta a atividade do **carbono**
  - Quanto **maior** o teor de **silício**, **menor** a capacidade da matriz de suportar teores de **carbono**
  - **Silício** tem efeito **inoculante**, promovendo a **nucleação** de **grafita**
  - **Silício** promove a **formação** e **endurece** a **ferrita** (pró eutetóide, da perlita e do eutetóide estável) por **solução sólida**
  - Carbono Equivalente: **CE = %C + 1/3 %Si**

newton.fukumasu@usp.br

Ligas metálicas e precipitados

- Carbono equivalente em ferros fundidos
  - Adição de Silício aumenta o intervalo entre as temperaturas dos eutéticos estável e meta-estável
  - **2% Si aumenta em 29ºC a diferença entre T_{ee} e T_{em}**



newton.fukumasu@usp.br

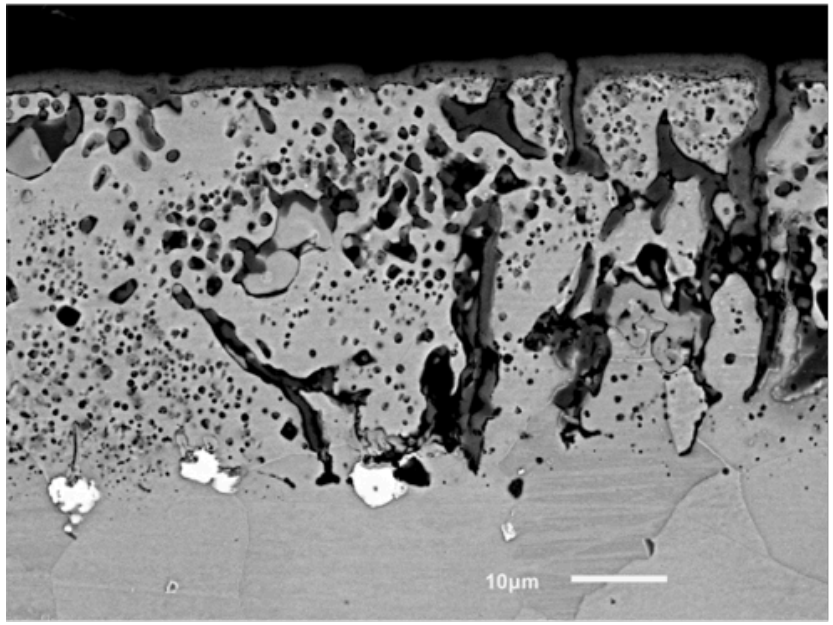
Ligas metálicas e precipitados

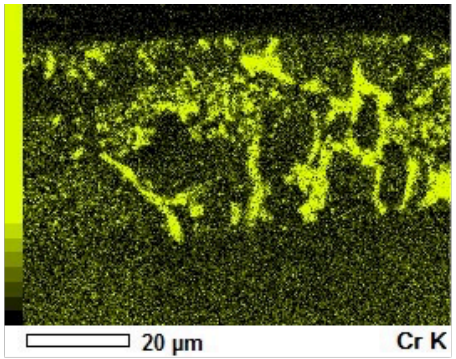
- Adição de outros componentes
  - **Formação de carbonetos, sulfetos**
  - **Partículas geralmente duras e frágeis**
  - **Propriedades podem ser engenheiradas (multicomponentes, propriedades mecânicas e térmicas)**
  - **Precipitados podem ser utilizados para diminuir movimentação de discordâncias, desgaste, atrito**

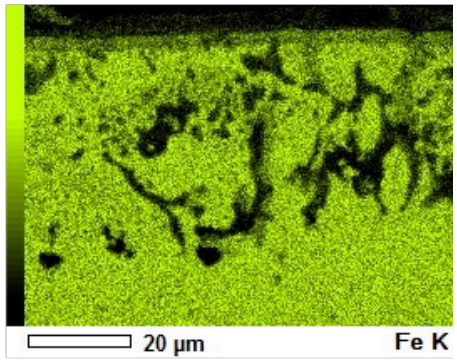
newton.fukumasu@usp.br

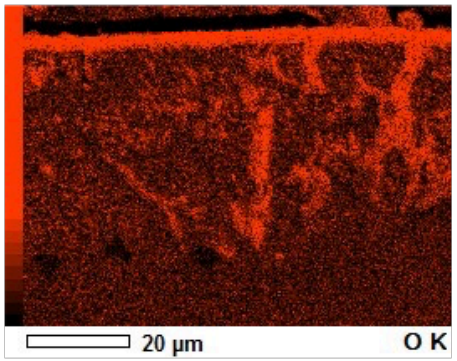
Ligas metálicas e precipitados

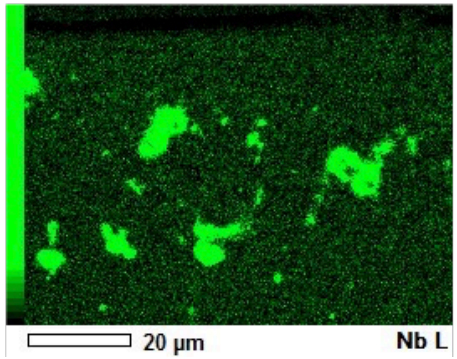
❖ Adição de outros componentes





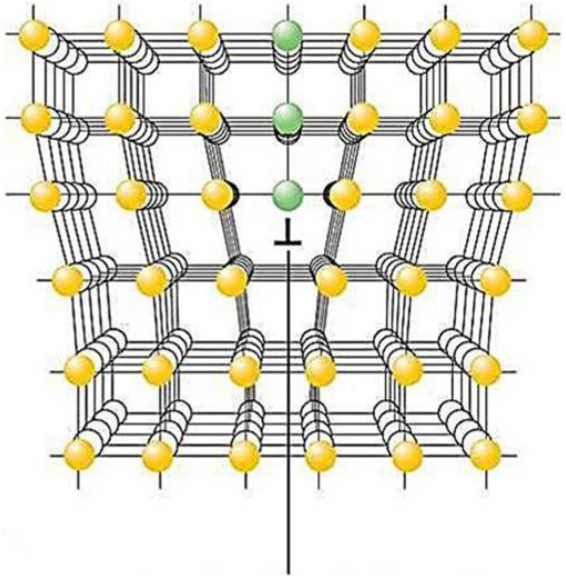


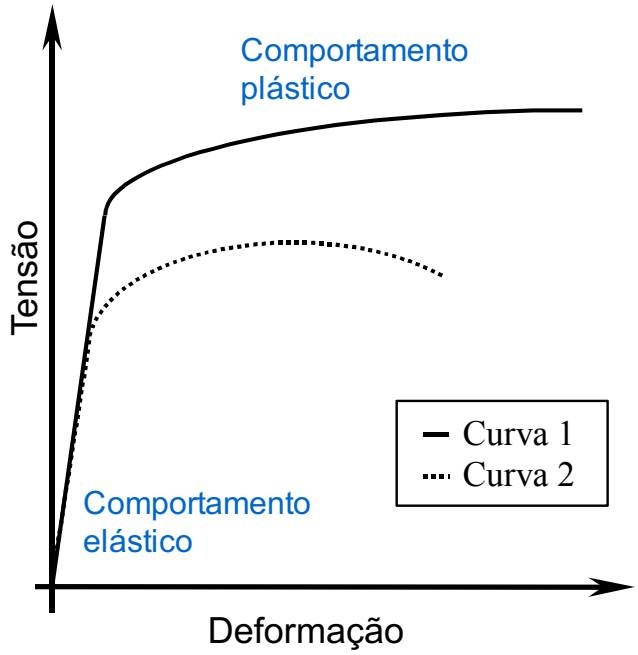


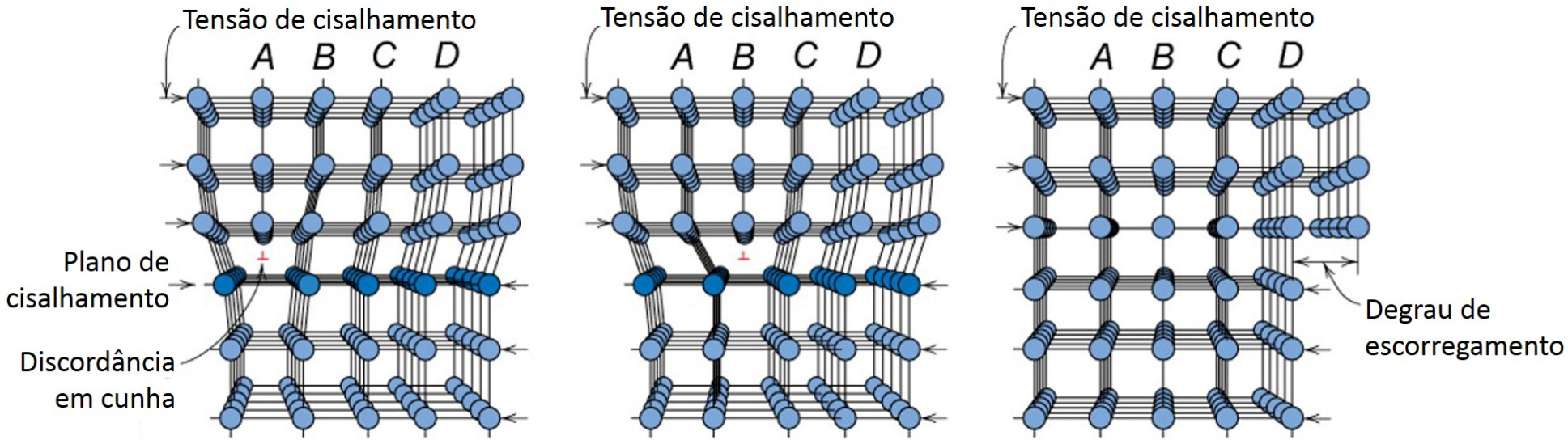


newton.fukumasu@usp.br

Influência da precipitação





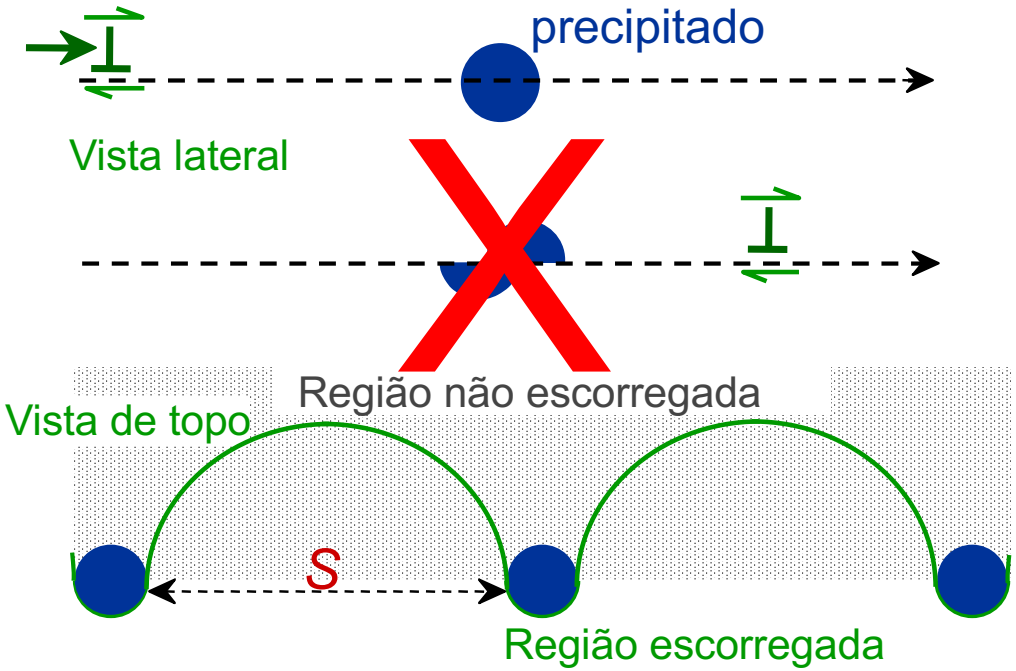


newton.fukumasu@usp.br

Influência da precipitação

❖ Partículas de segunda fase

- Precipitados duros são difíceis de cisalhar



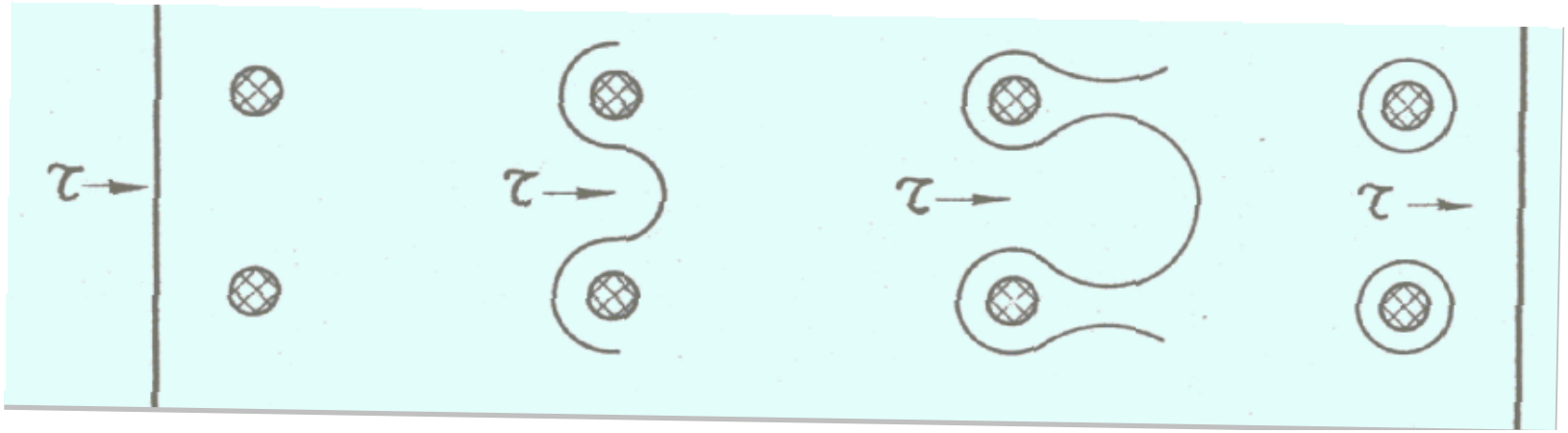
Altas tensões de cisalhamento são necessárias para mover discordâncias em **direção ao precipitado** e para **cisalhá-lo**

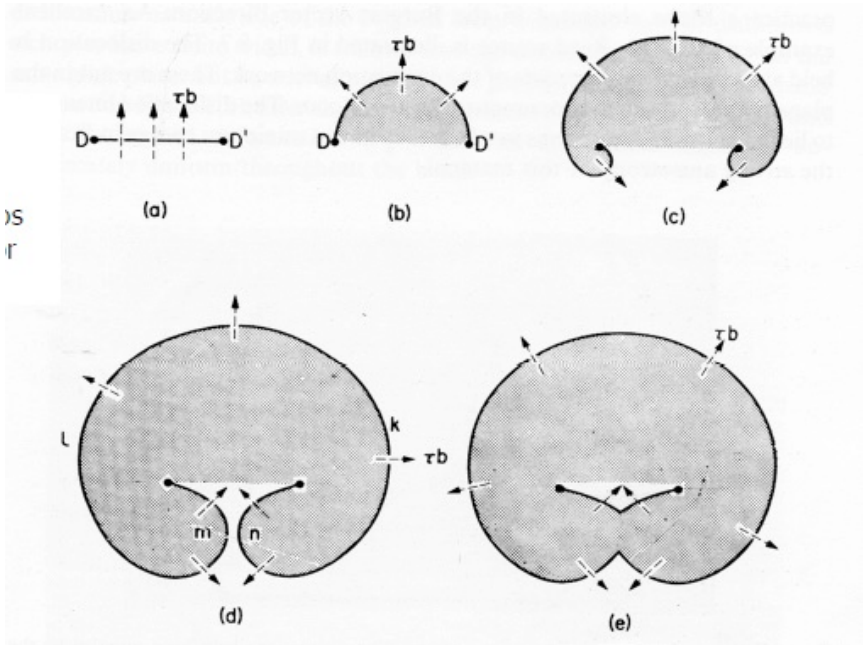
Precipitados agem como **"locais" de ancoragem**

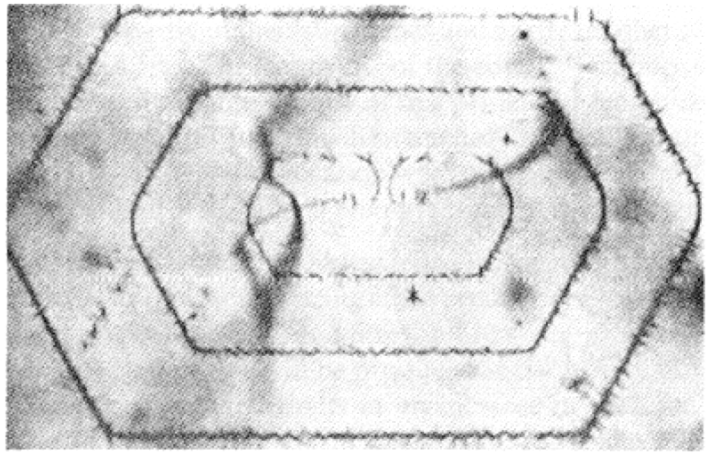
- Resultado: $\sigma_y \sim \frac{1}{S}$

newton.fukumasu@usp.br

Influência da precipitação





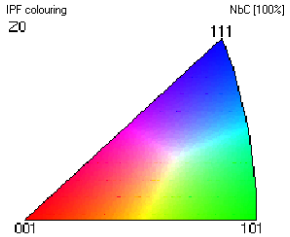


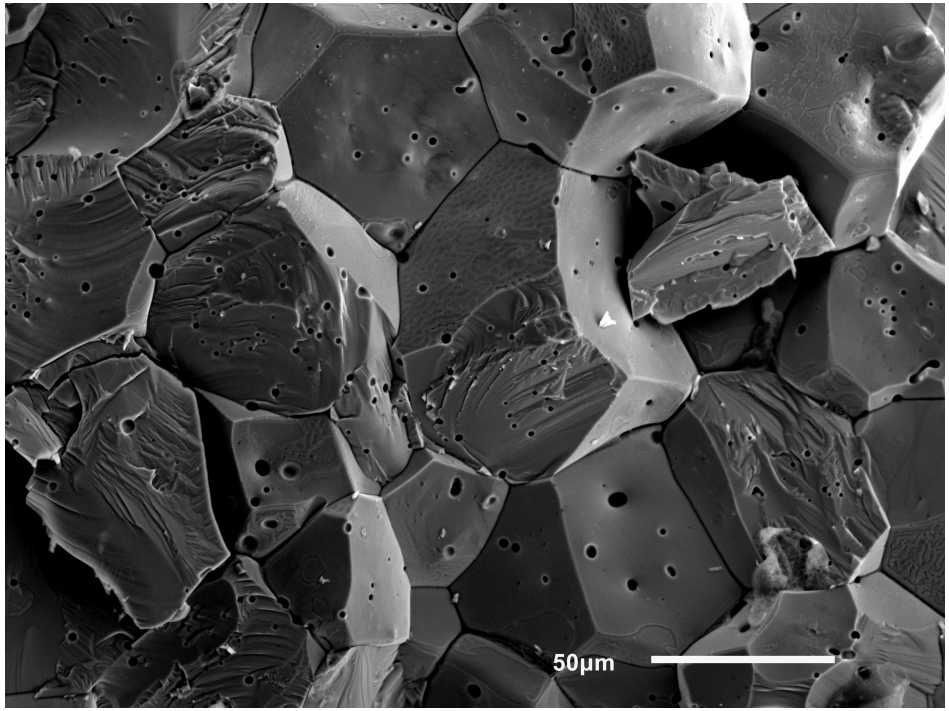
Fonte de Frank Read em um cristal de Si

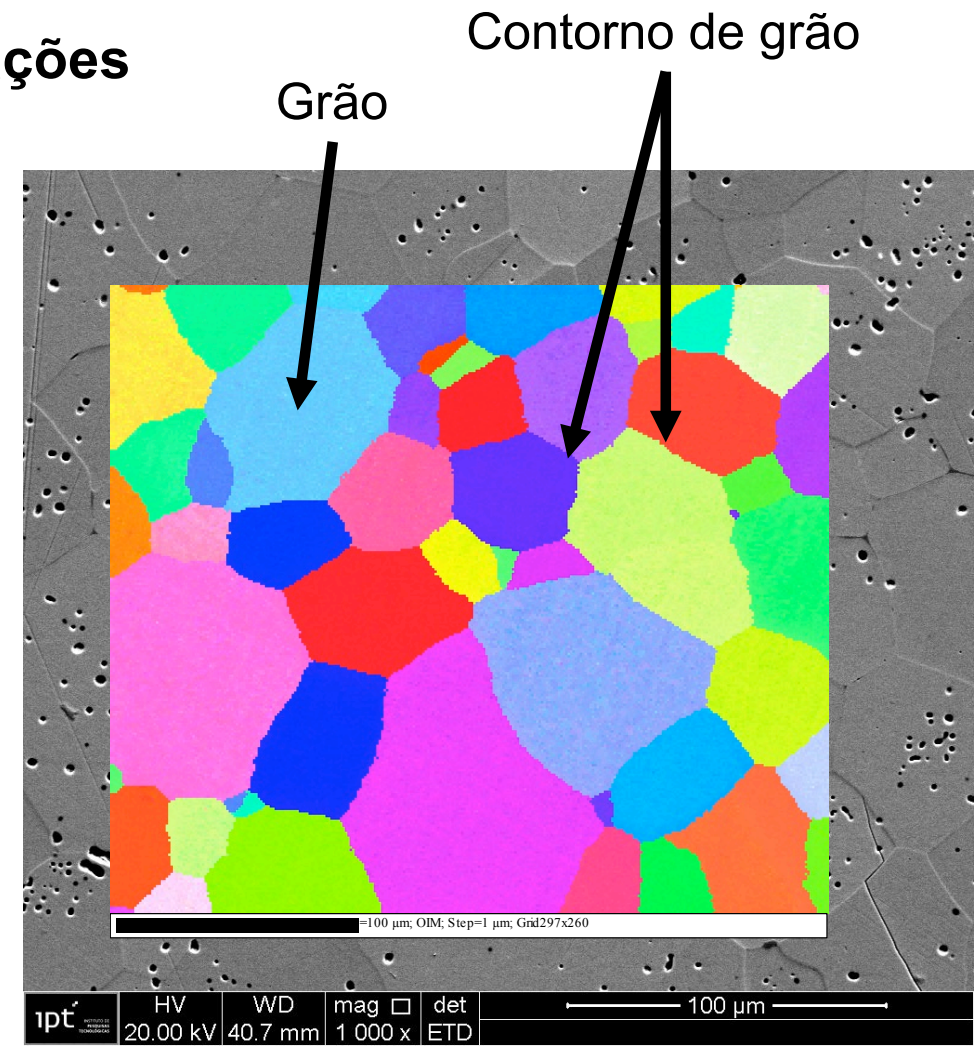
newton.fukumasu@usp.br

Influência do contorno de grão

- **Material policristalino**
  - **Carboneto de Nióbio cúbico**
  - **Grãos com diferentes orientações**







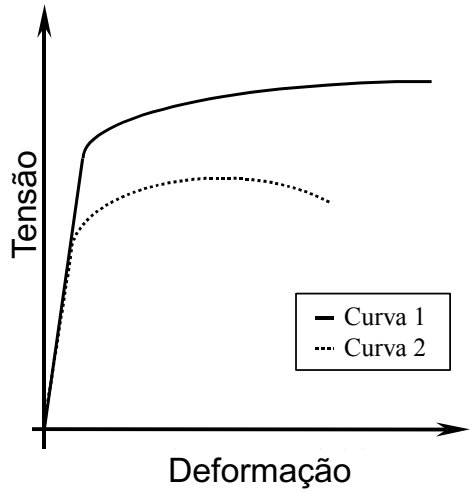
newton.fukumasu@usp.br

Influência do contorno de grão

- Contornos de grão
  - Modelo de Hall-Petch

Medidas experimentais

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$



σ_y = Tensão para a qual o material se deforma plasticamente

σ_0 = Constante do material – valor para início da movimentação de discordâncias

k_y = Constante do material

d = tamanho médio dos grãos

Hull, D. , Bacon, D. J. Introduction to dislocations

newton.fukumasu@usp.br

Tamanho de grão & resistência mecânica

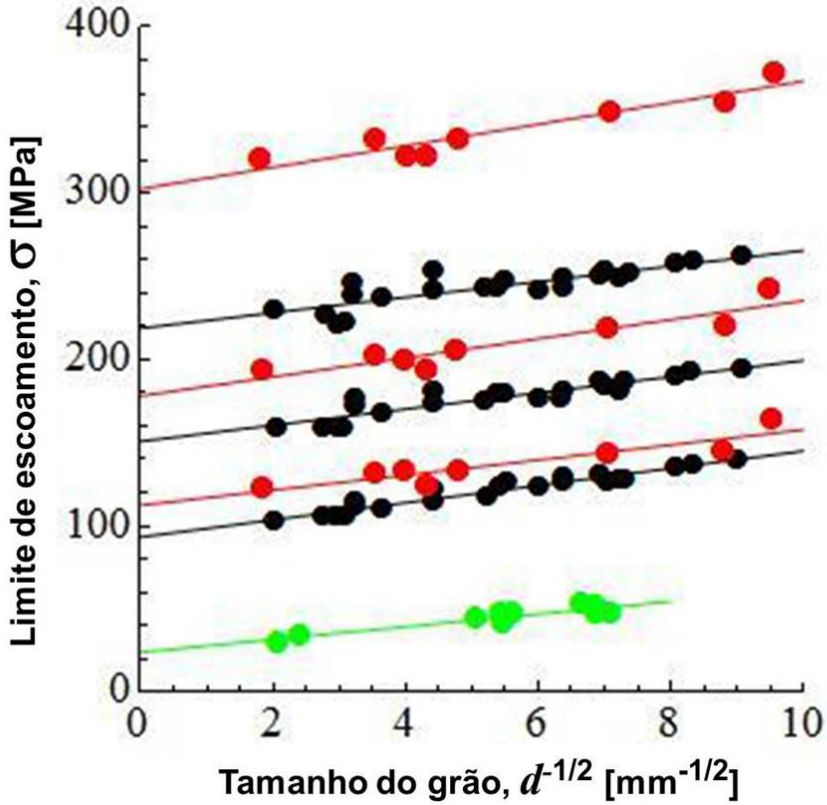
$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y\, d^{-1/2}$$ Hall & Petch

σ_y = Tensão para a qual o material se deforma plasticamente

σ_0 = Constante do material – valor para início da movimentação de discordâncias

k_y = Constante do material

d = tamanho médio dos grãos



Cu(1) T_{Nliq} — Hansen, N., Ralph, B., 1982. The strain and grain size dependence of the flow stress of copper. Acta Met. 30, 411–417.

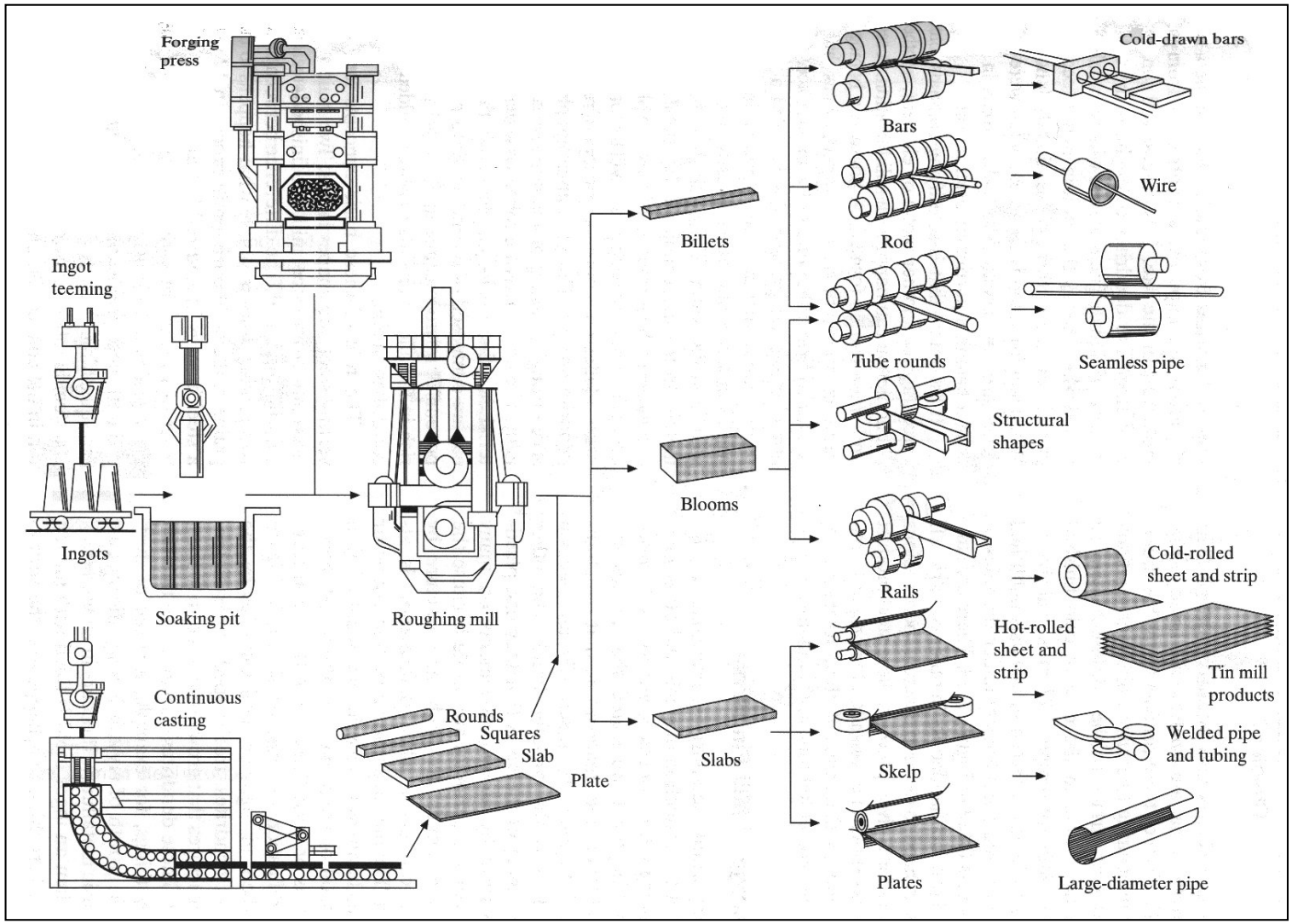
Cu(2) T_{amb} — Hansen, N., Ralph, B., 1982. The strain and grain size dependence of the flow stress of copper. Acta Met. 30, 411–417.

Cu(3) — Armstrong, R.W., Elban, W.L., 2012. Hardness properties across multiscales of applied loads and material structures. Mater. Sci. Technol. 28, 1060–1071.

newton.fukumasu@usp.br

Processos siderúrgicos

- Fundição
- **Laminação**
- **Forjamento**



newton.fukumasu@usp.br

Laminação

newton.fukumasu@usp.br

Laminação

newton.fukumasu@usp.br

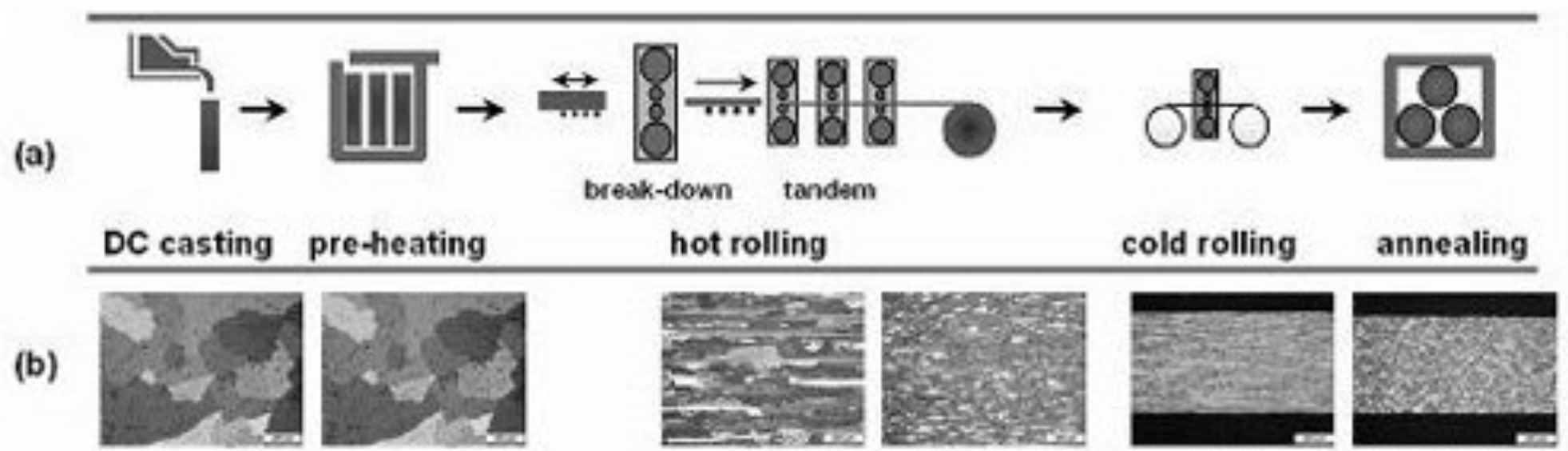
Laminação

Cold Rolling	Hot Rolling

https://www.slideshare.net/palanivendhan/mechanical-working-of-metals-37308919

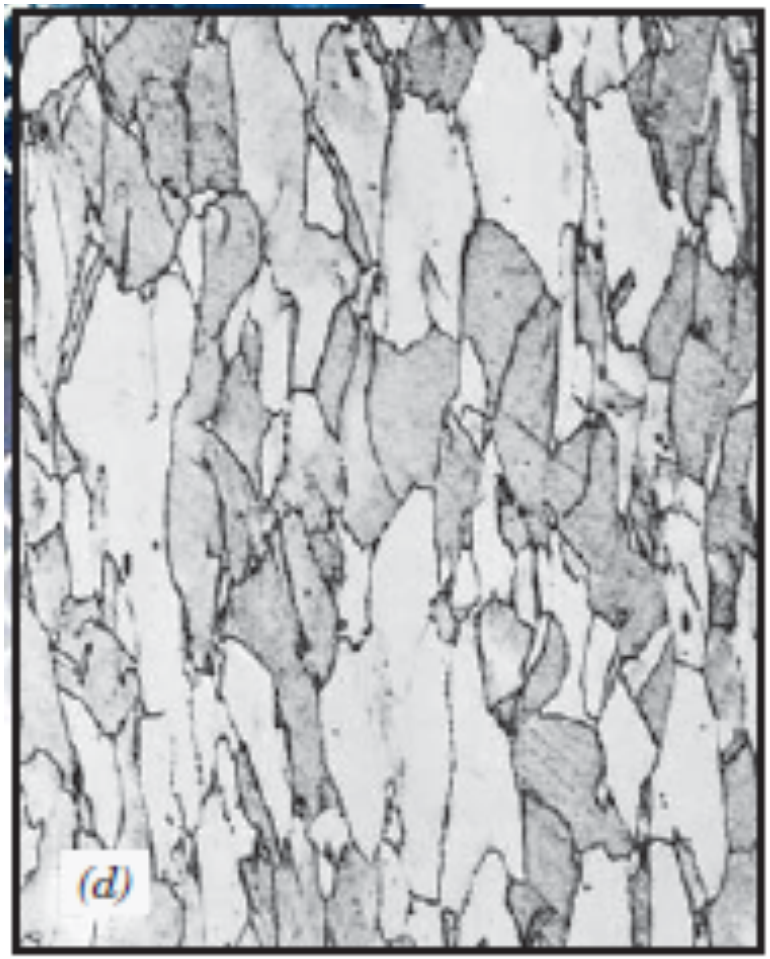
newton.fukumasu@usp.br

Laminação



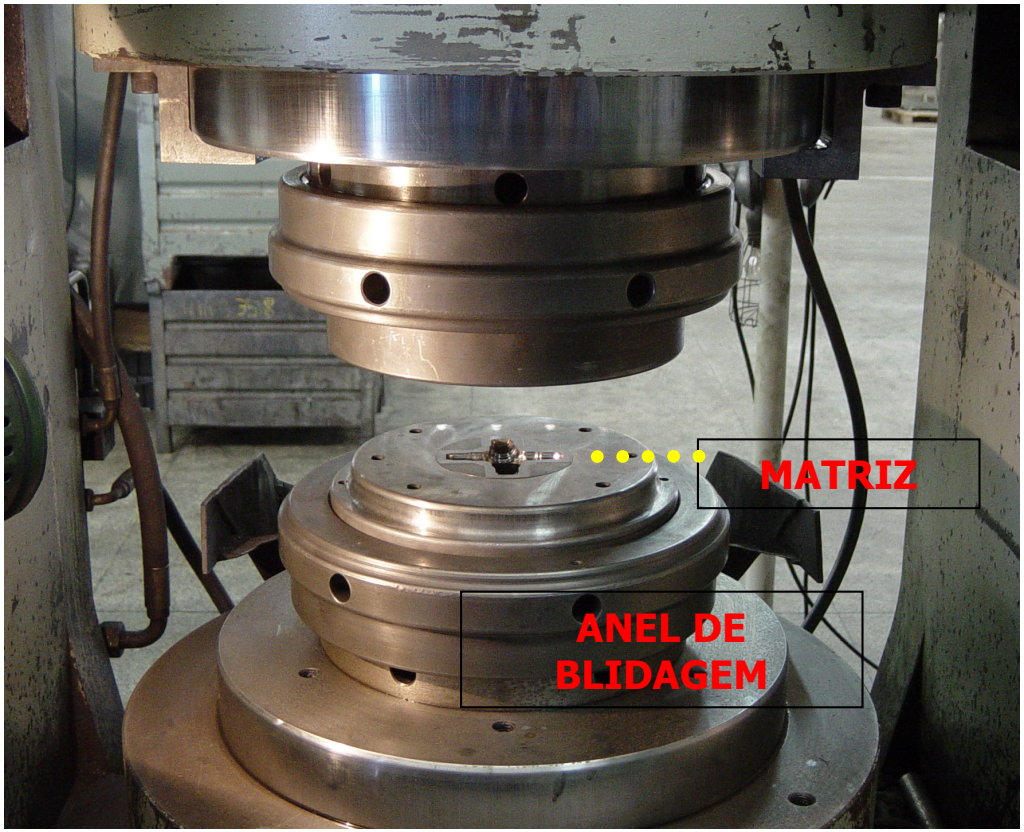
newton.fukumasu@usp.br

Laminação e Forjamento



newton.fukumasu@usp.br

Forjamento



newton.fukumasu@usp.br

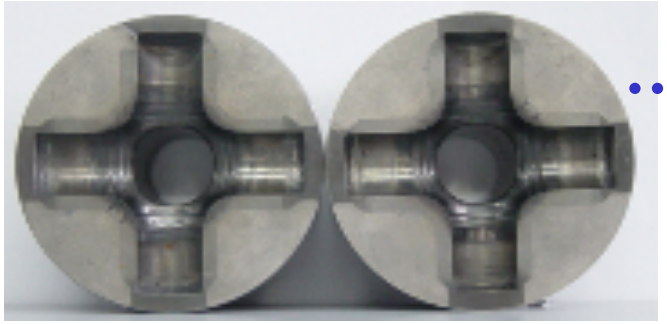
Forjamento

Aço ferramenta

CONJUNTO DE ANEL DE BLINDAGEM SUP. E INF.

MATERIAL: VCO

DUREZA:46...48 HRC



MATRIZ SUPERIOR E INFERIOR

MARTERIAL:HOTWAR/VWM2

DUREZA:56...58 HRC

PUNÇÃO EXTRATOR-INF. E SUP.

MATERIAL:VWM2

DUREZA:60...63 HRC

BATOQUE DE ALINHAMENNTO DAS MATRIZES

MATERIAL:SAE 1045

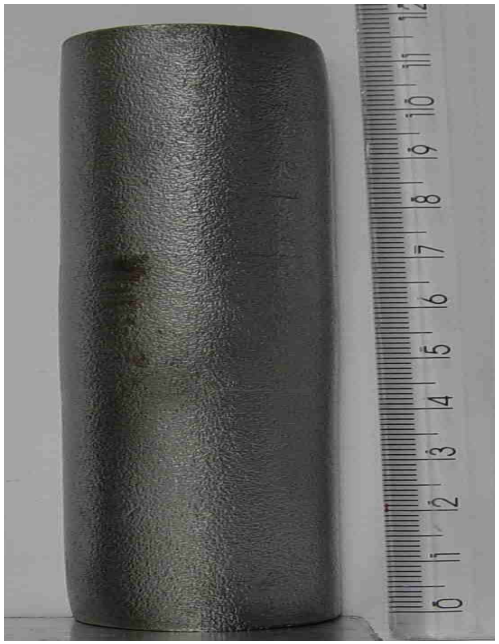
DUREZA:28...32 HRC

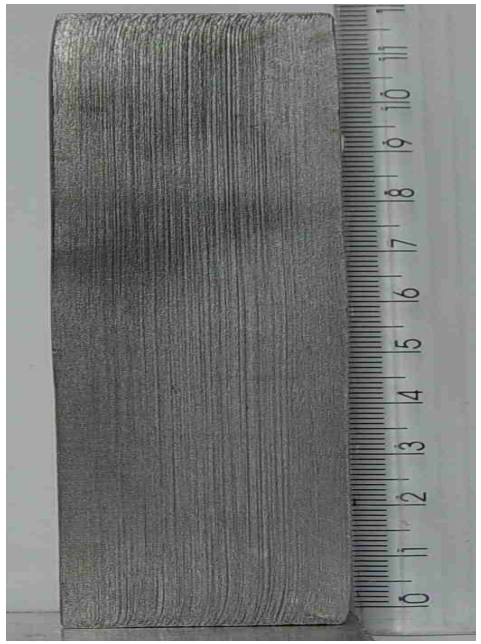
newton.fukumasu@usp.br

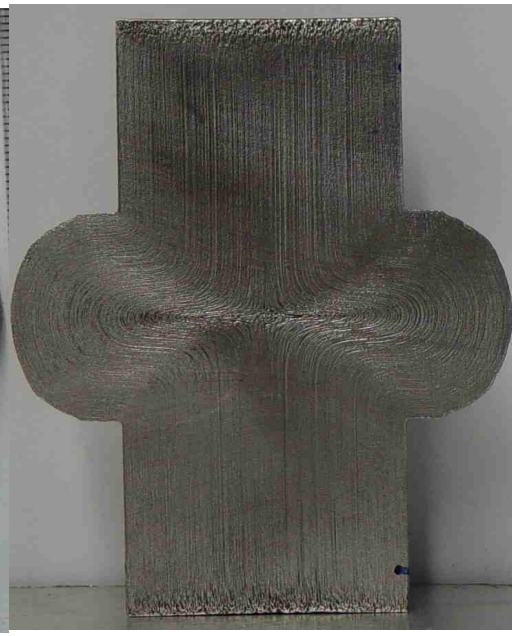
Forjamento

Inicial

Altura = 79,12 mm
Redução percentual da altura = 33,85 %
Relação deformação (h/d) = 2,62

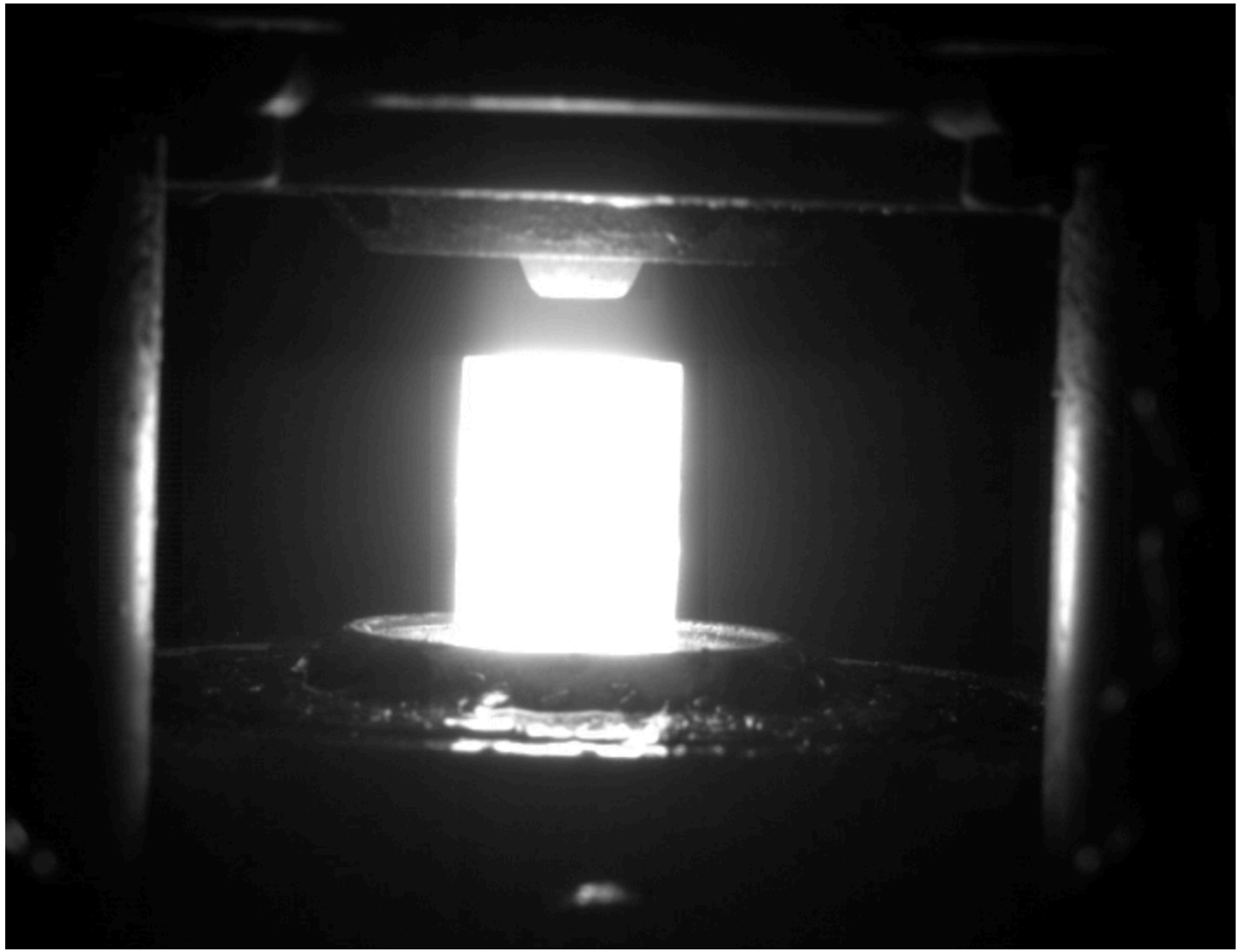






newton.fukumasu@usp.br

Forjamento



newton.fukumasu@usp.br

Laminação e forjamento

- Mudança nas propriedades dos materiais

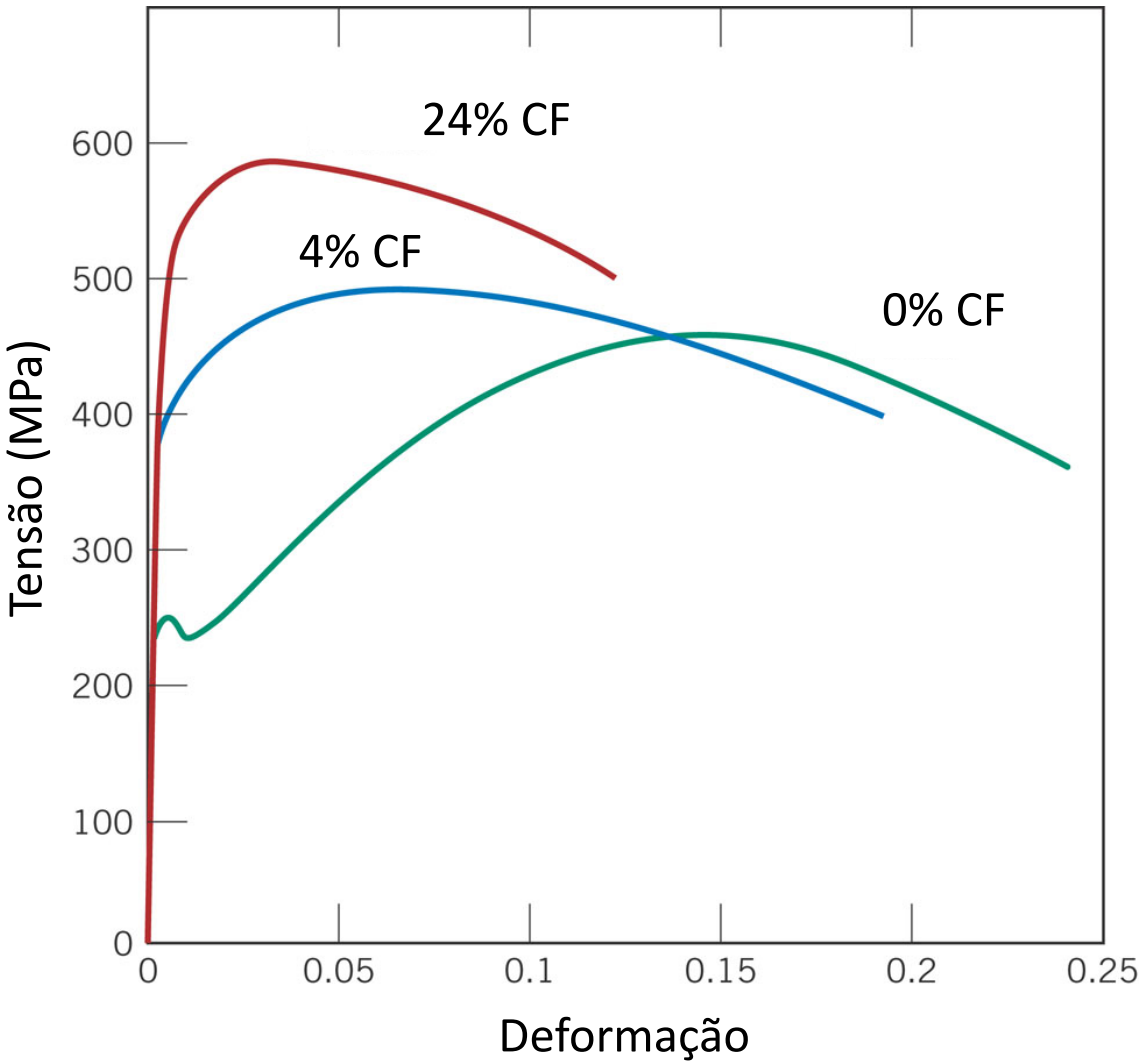
  - Processos a frio
    - Reorientação preferencial dos grãos na direção de escoamento do material
    - Aumento de tensão residual compressiva
    - Diminuição da ductilidade
    - Melhor acabamento superficial

  - Processos a quente
    - Recristalização dos grãos com diminuição do diâmetro
    - Alivio de tensões do processo
    - Problemas com acabamento superficial

newton.fukumasu@usp.br

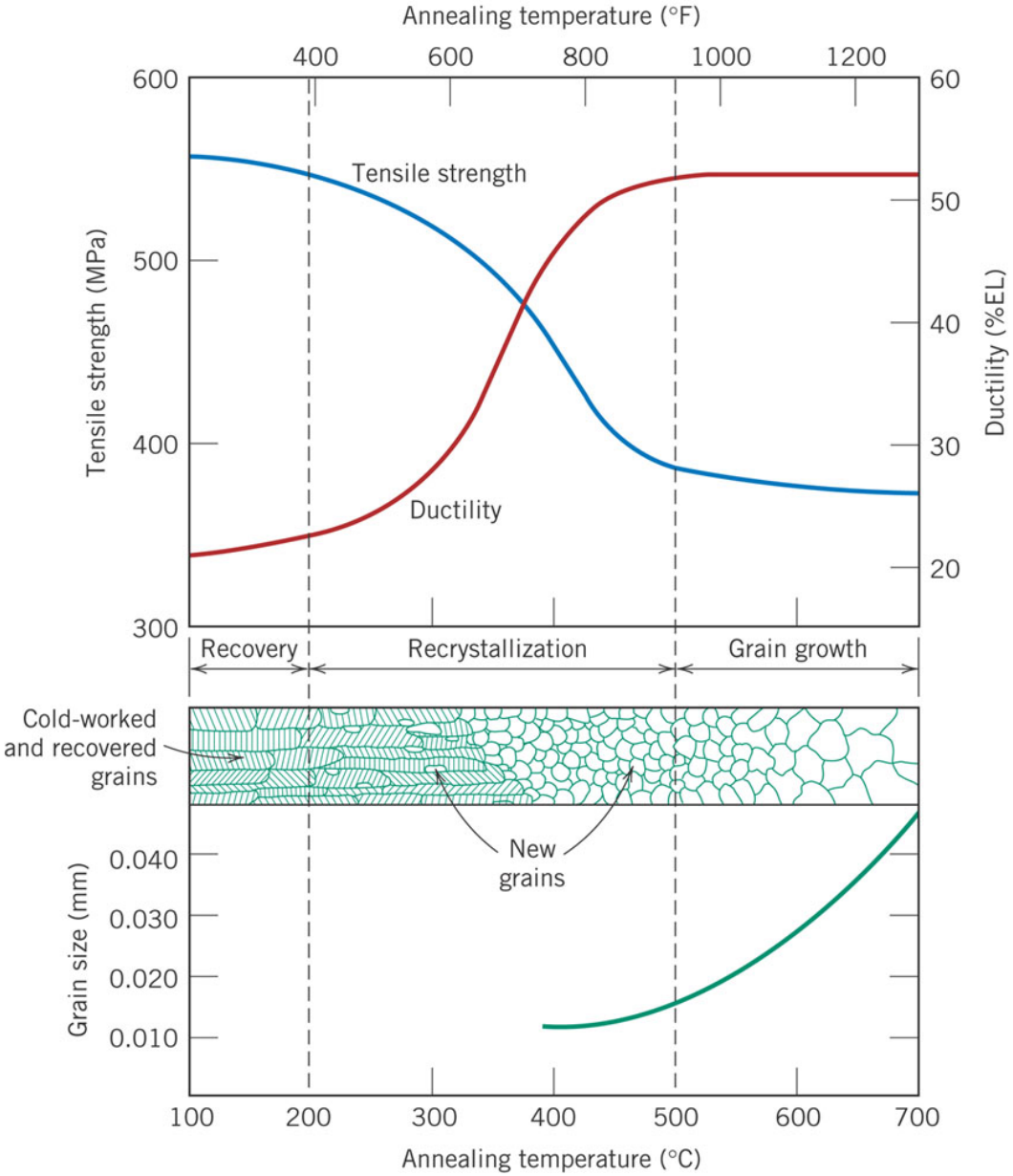
Influência do processo

❖ **Processos a frio**



newton.fukumasu@usp.br

Influência do processo



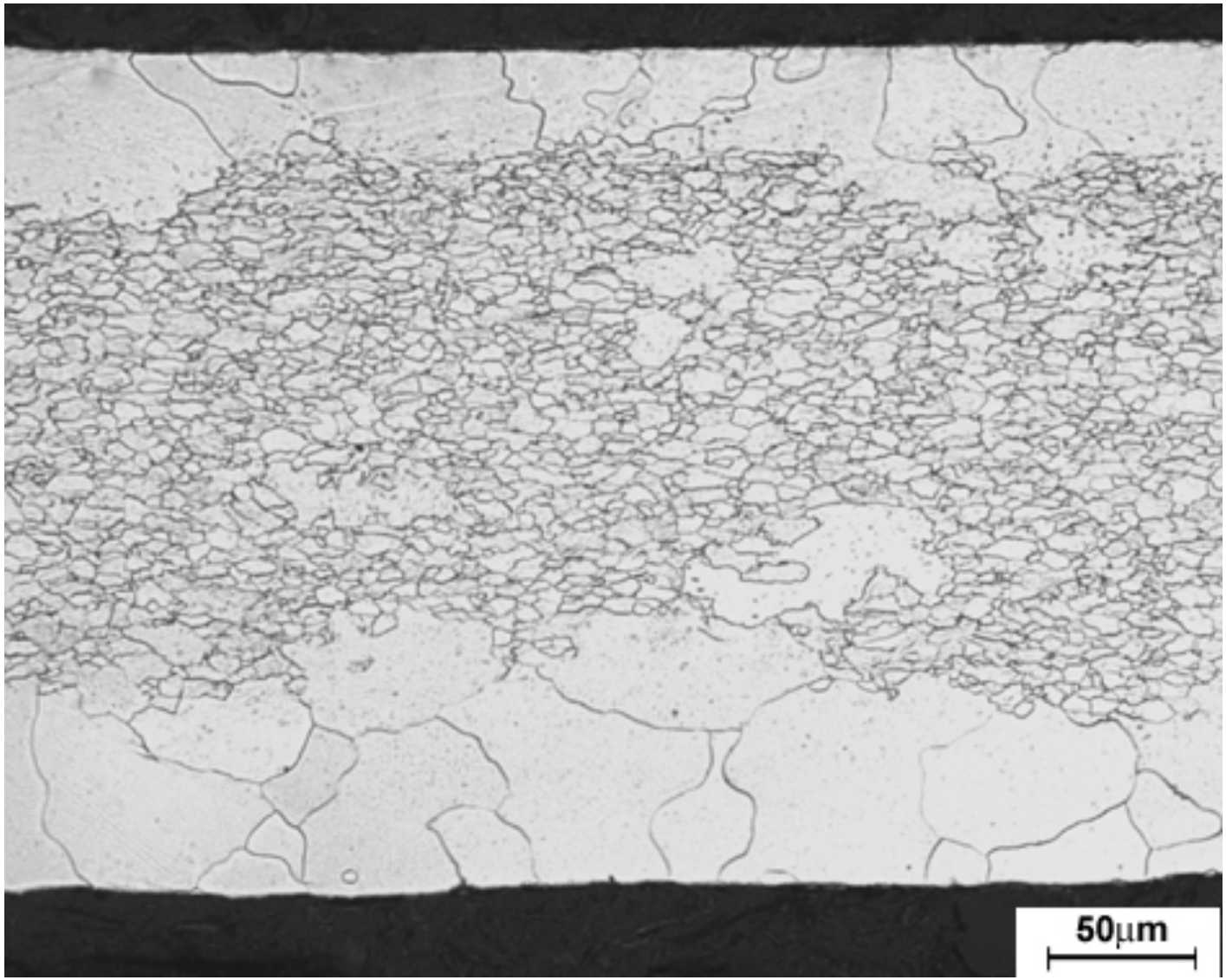
newton.fukumasu@usp.br

Laminação e forjamento

- Quais produtos são laminados?
- Quais produtos são forjados?
- Se eu quiser laminar, forjar ou estampar a frio, é bom ter precipitados na microestrutura?
- Se quiser construir uma mola?
- E se for construir uma panela de cozinha?
- Se for construir uma engrenagem, precipitados são importantes? E a microestrutura?

newton.fukumasu@usp.br

Influência do contorno de grão



newton.fukumasu@usp.br