

# *XXXVI Seminário de Laminação*

*Processos e Produtos  
Laminados e Revestidos*

# Desenvolvimento de um Sistema de Resfriamento para a Simulação Laboratorial do Resfriamento de Tiras a Quente

Autores:

Luiz Alberto C. Bustamante  
Marcos Domingos Xavier  
Maurício Domingos de Campos Jr.  
Paulo Roberto Mei

# Evolução Microestrutural no LTQ

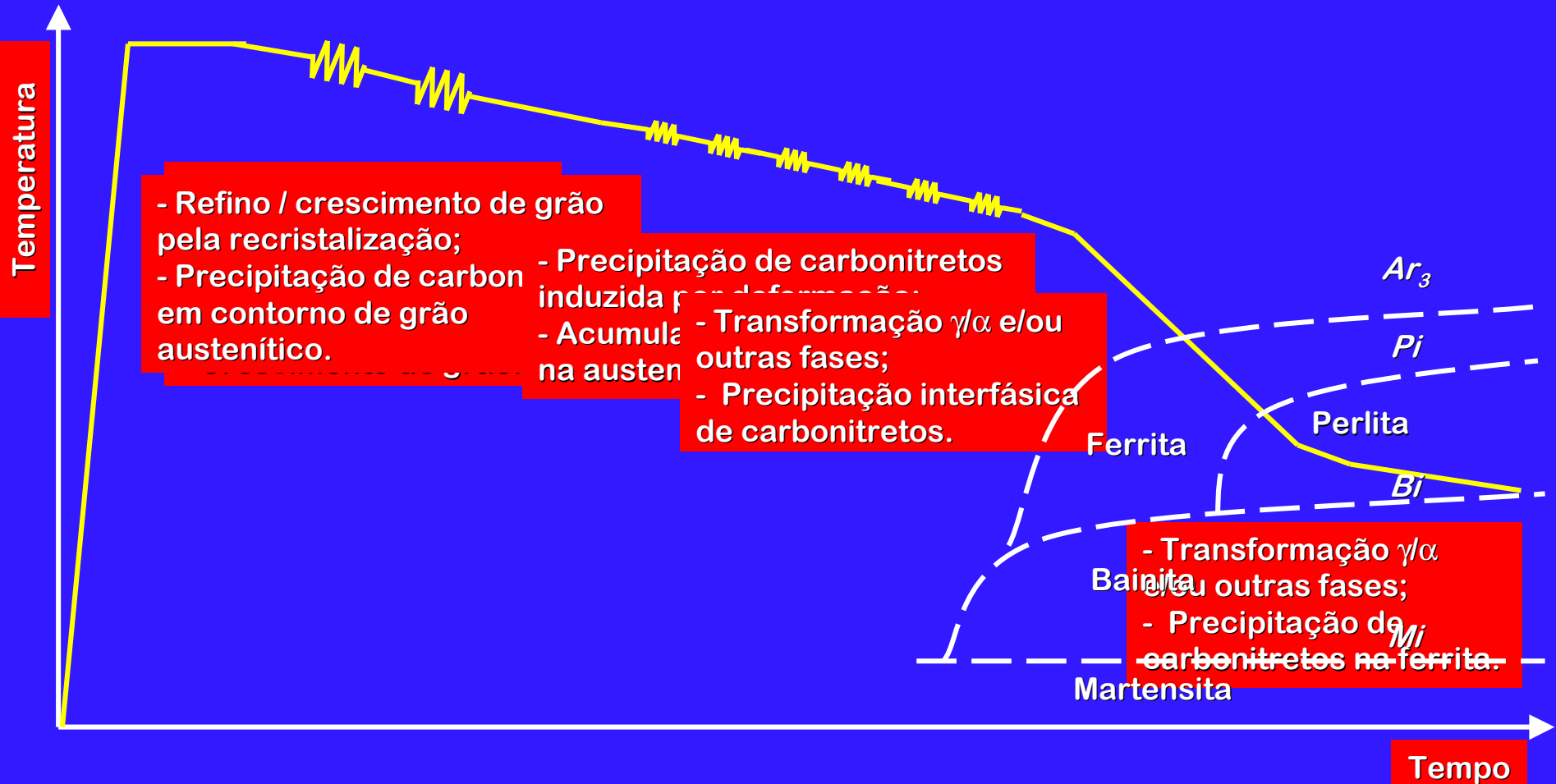
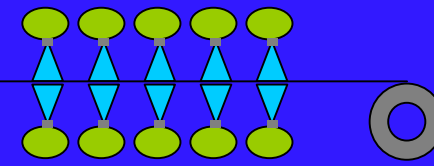
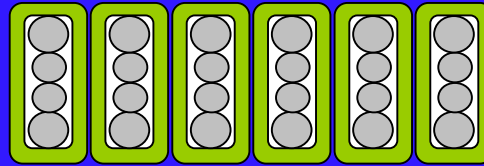
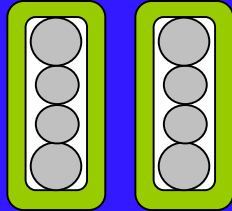
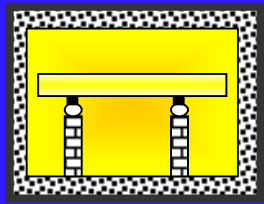
Reaquecimento

Esboço

Acabamento

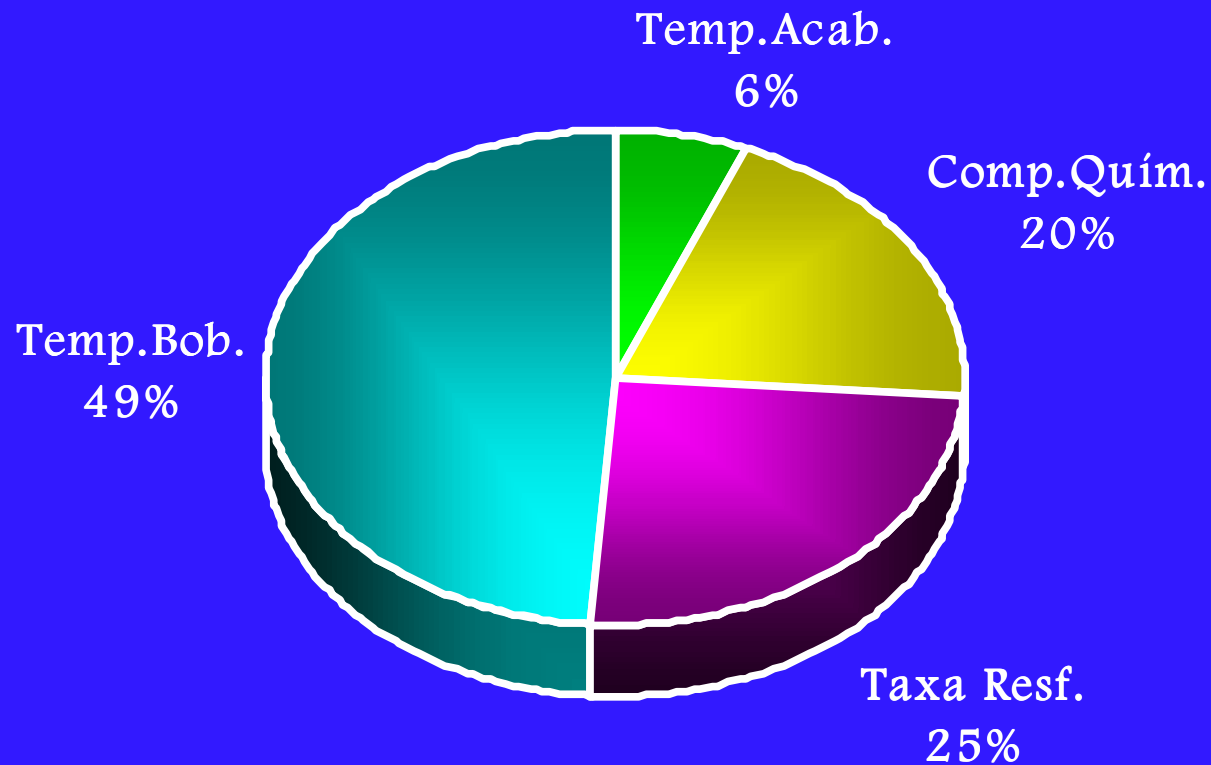
Resfriamento

Bobinamento

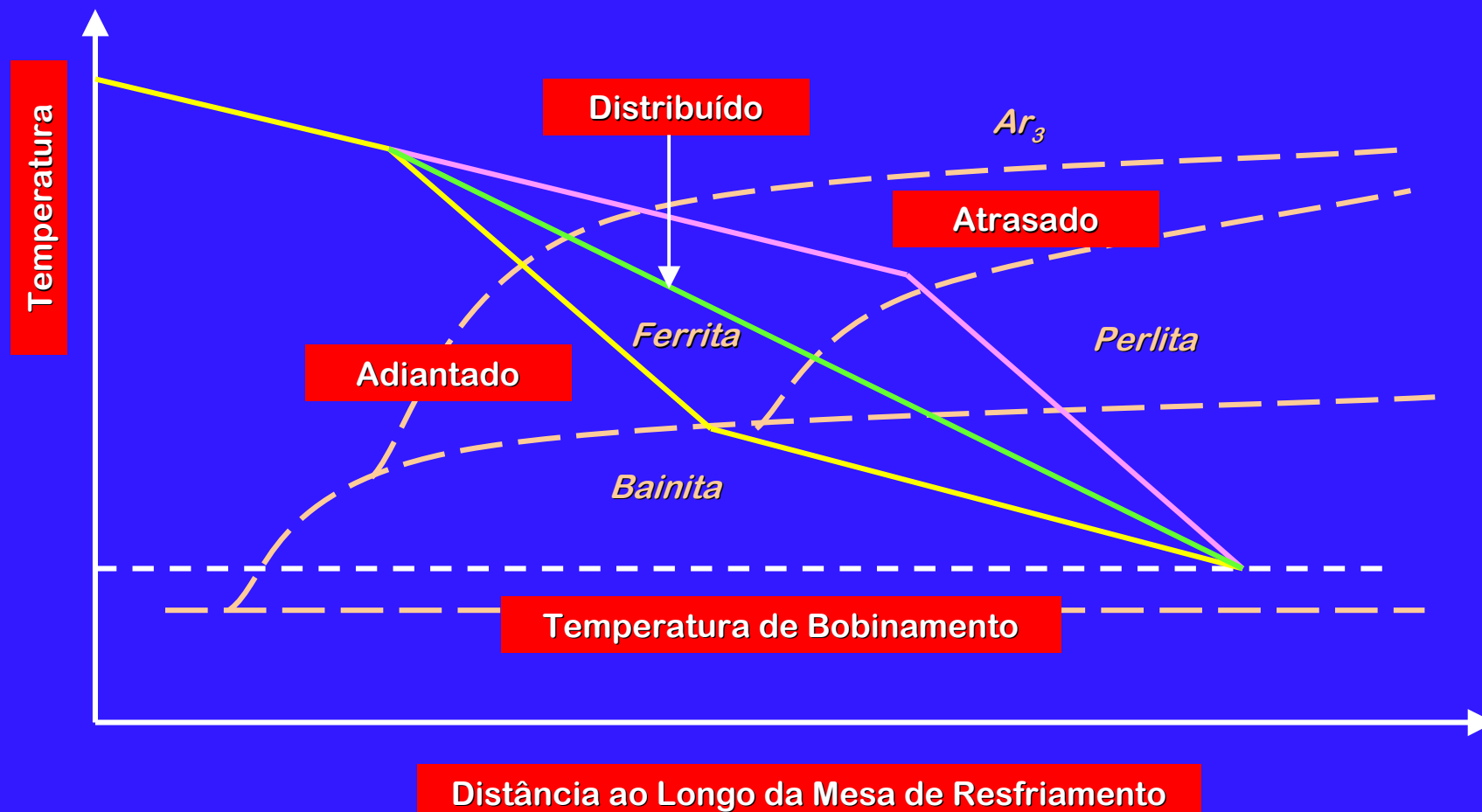


# Importância Tecnológica

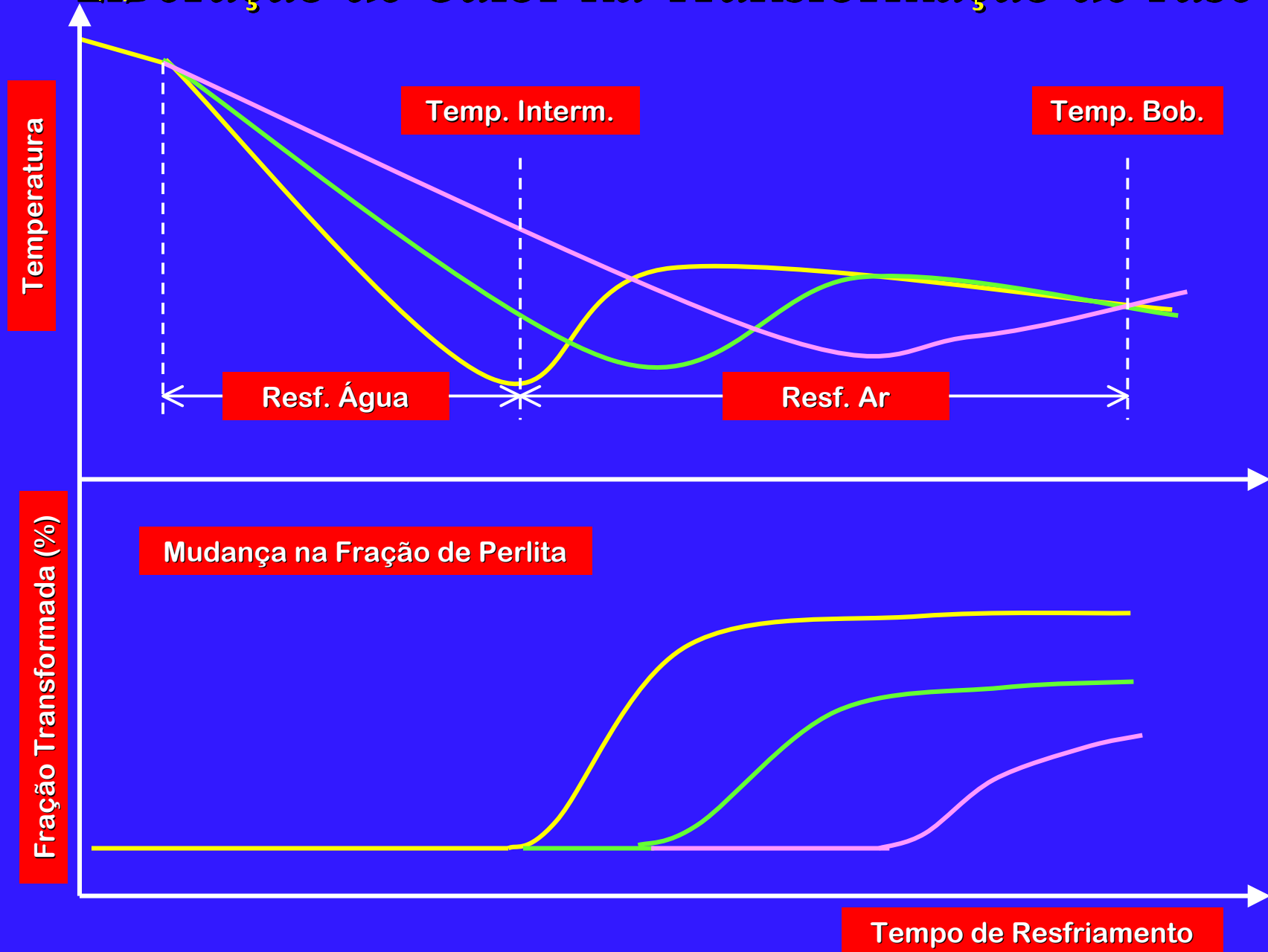
Fontes de Variação do Limite de Escoamento em Tiras Laminadas a Quente de Aços Microligados do Grau 350 MPa



# Estratégias de Resfriamento



# Liberação de Calor na Transformação de Fase



# Mecanismos de Endurecimento dos Aços

$$\sigma_y = \sigma_0 + \sigma_{ss} + \sigma_{pcpt} + \sigma_{disc} + \sigma_{text} + k_y d_g^{-1/2}$$

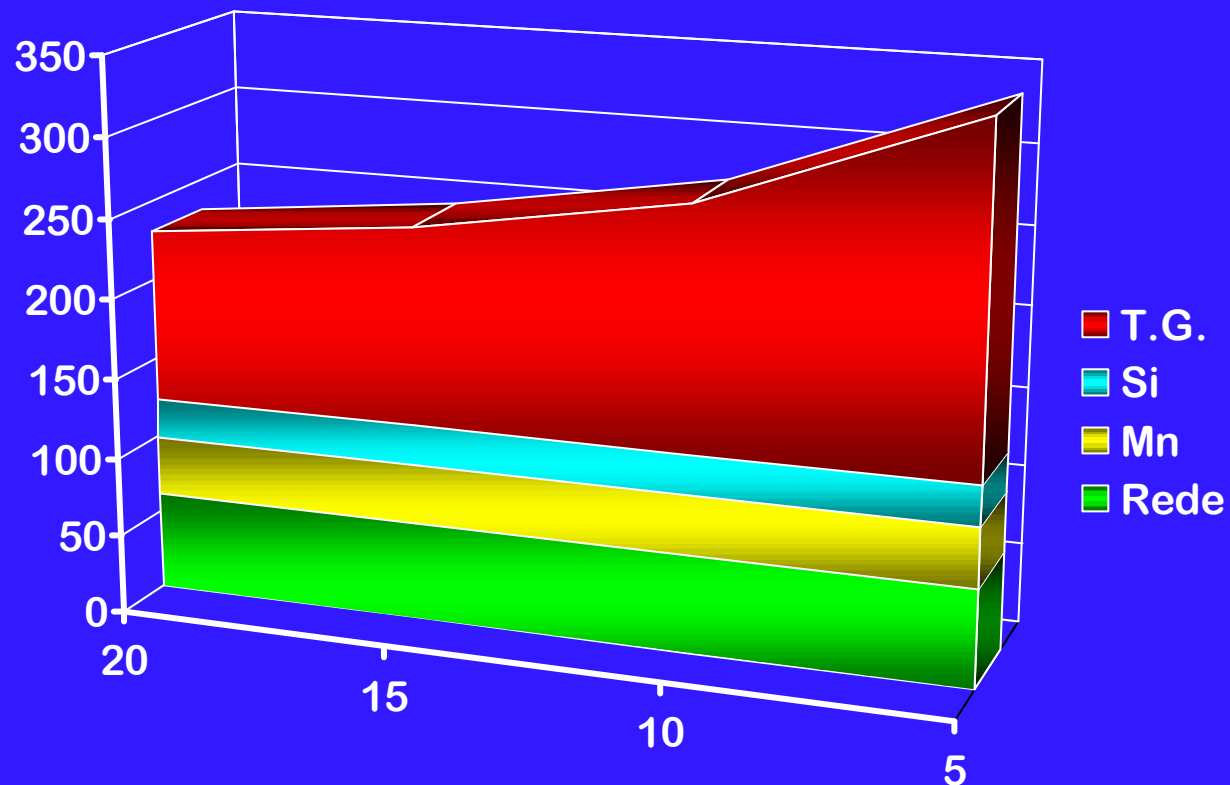
- $\sigma_y$  = tensão de escoamento ✓
- $\sigma_0$  = tensão de atrito ✓
- $\sigma_{ss}$  = endurecimento por solução sólida ✓
- $\sigma_{pcpt}$  = endurecimento por precipitação ou dispersão ✓
- $\sigma_{disc}$  = endurecimento por discordâncias ou subestruturas ✓
- $\sigma_{text}$  = endurecimento por textura cristalográfica ✓
- $k_y d_g^{-1/2}$  = endurecimento por refino de grão ✓

## Efeito do Refino de Grão

$$\sigma_y = 62 + 37 (\%Mn) + 83 (\%Si) + 2918 (\%N_{\text{livre}}) + 15,1 d_g^{-1/2} \text{ (MPa)}$$

Lim. Esc. (MPa) x Tam. Grão (Mícron)

Aço Baixo Carbono (1% Mn ~ 0,3% Si)





Parâmetros que Controlam o Tamanho

Composição Química

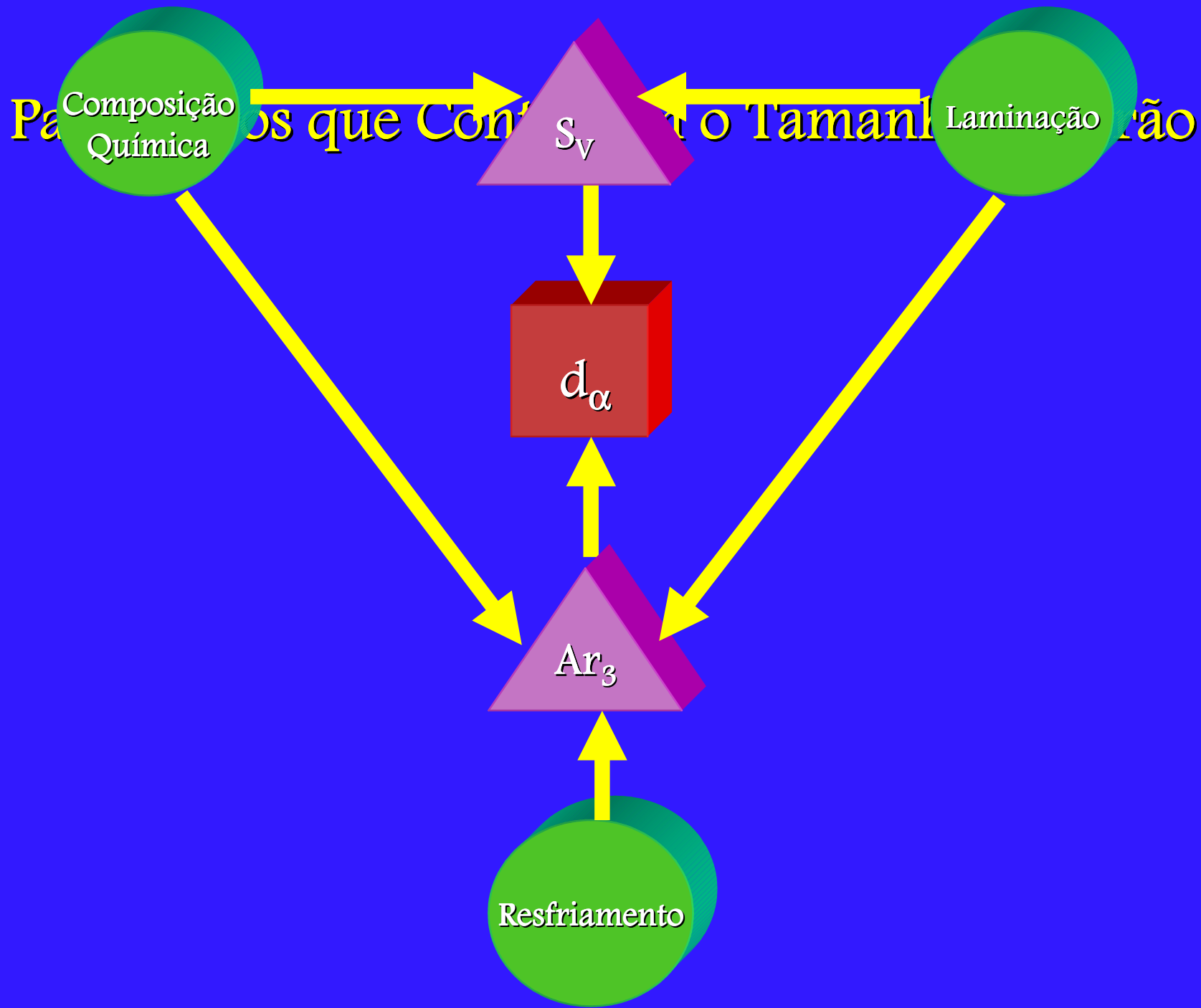
Laminação

$S_V$

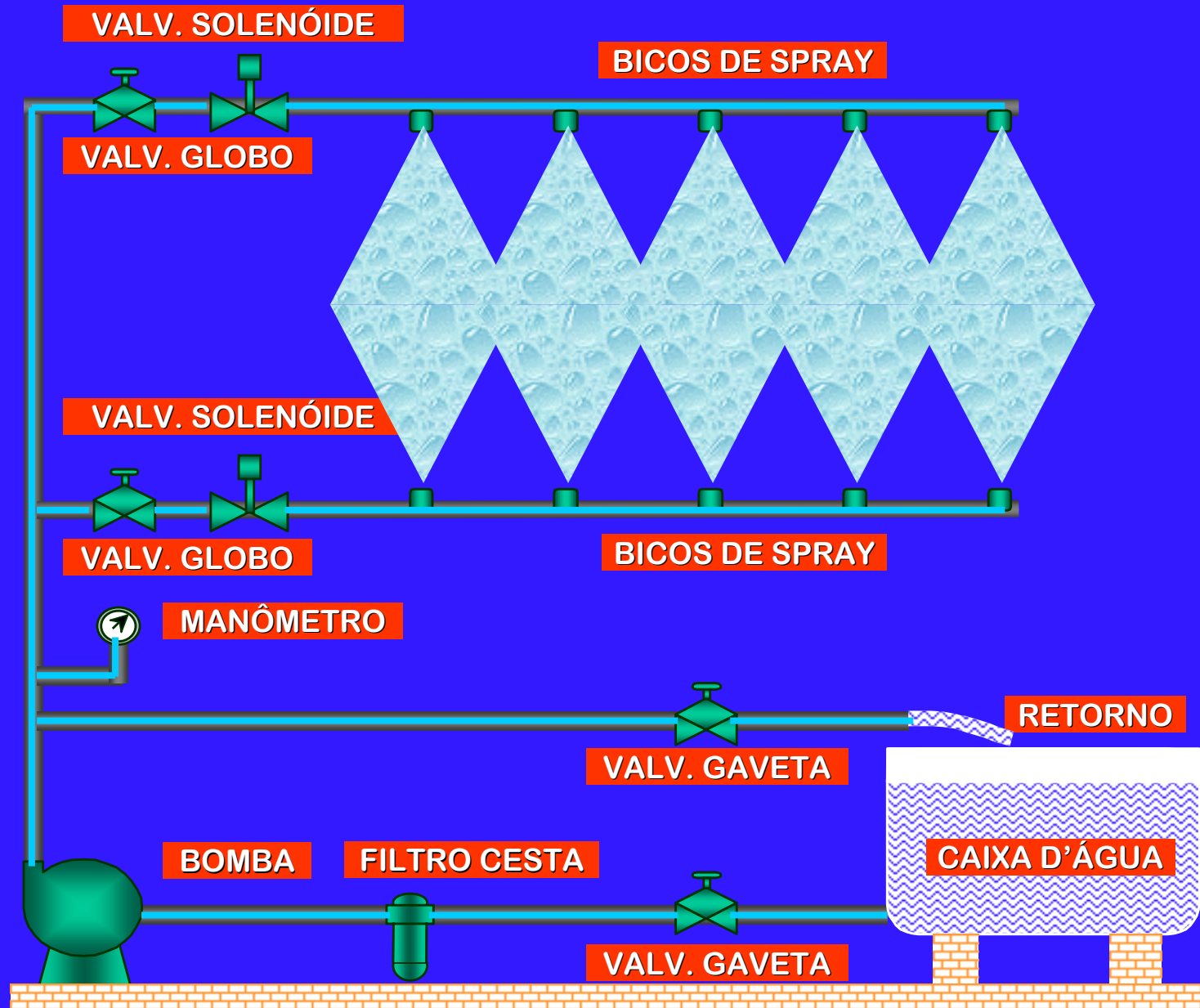
$d_\alpha$

$Ar_3$

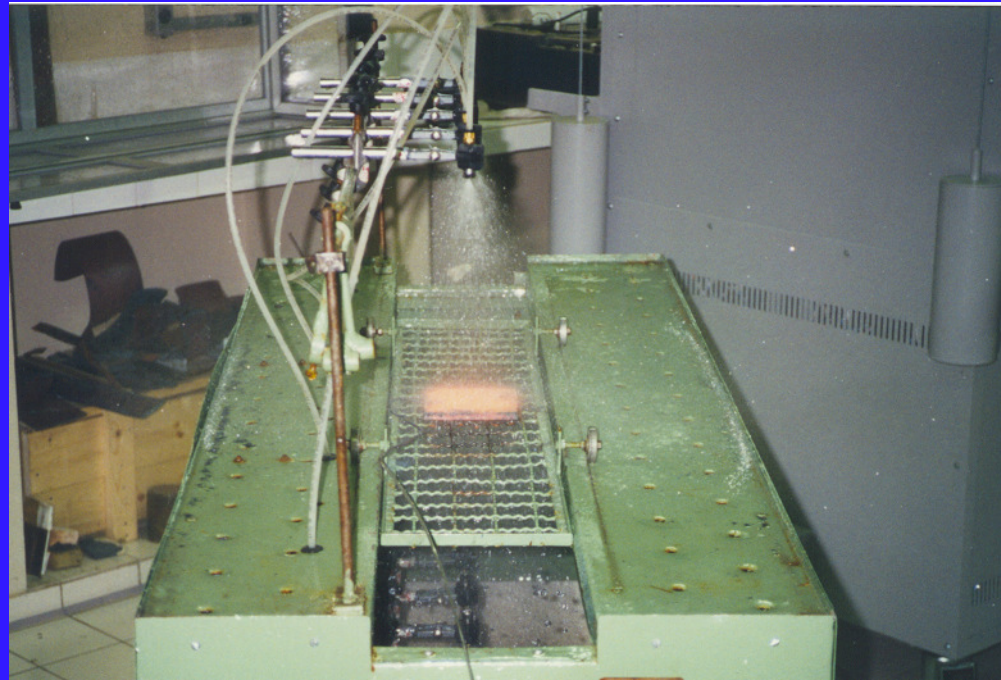
Resfriamento



# Sistema de Resfriamento Laboratorial



# Sistema de Resfriamento



## Vazão dos Bicos (l/min)

Bico / Pressão	10 psi	20 psi	40 psi	60 psi	80 psi	100 psi
GG 1.5	0,57	0,79	1,10	1,32	1,51	1,67
GG 3.0	1,14	1,58	2,20	2,64	3,02	3,34
HH 6.5	2,46	3,37	4,92	5,68	6,43	7,19
HH 10	3,79	5,30	7,19	9,08	10,22	11,36

# Problema

O aço ao Nb aplicado na produção de uma peça de conformação crítica apresentava trincas após uma etapa de expansão de furo.

## Especificação do Produto

Composição Química (%)						Propriedades Mecânicas			
C	Mn	P	S	Si	Al	L.E.	L.R.	Along.	Dobr.
(máx)	(máx)	(máx)	(máx)	(máx)	(mín)	(MPa)	(MPa)	(%)	calço
0,10	1,10	0,030	0,030	0,35	0,020	300	400	26	0
						400	500		

### Objetivo:

Desenvolver um aço com Limite de Escoamento máximo de **350 MPa**, Razão Elástica máxima de **0,75** e Alongamento mínimo de **30%**.

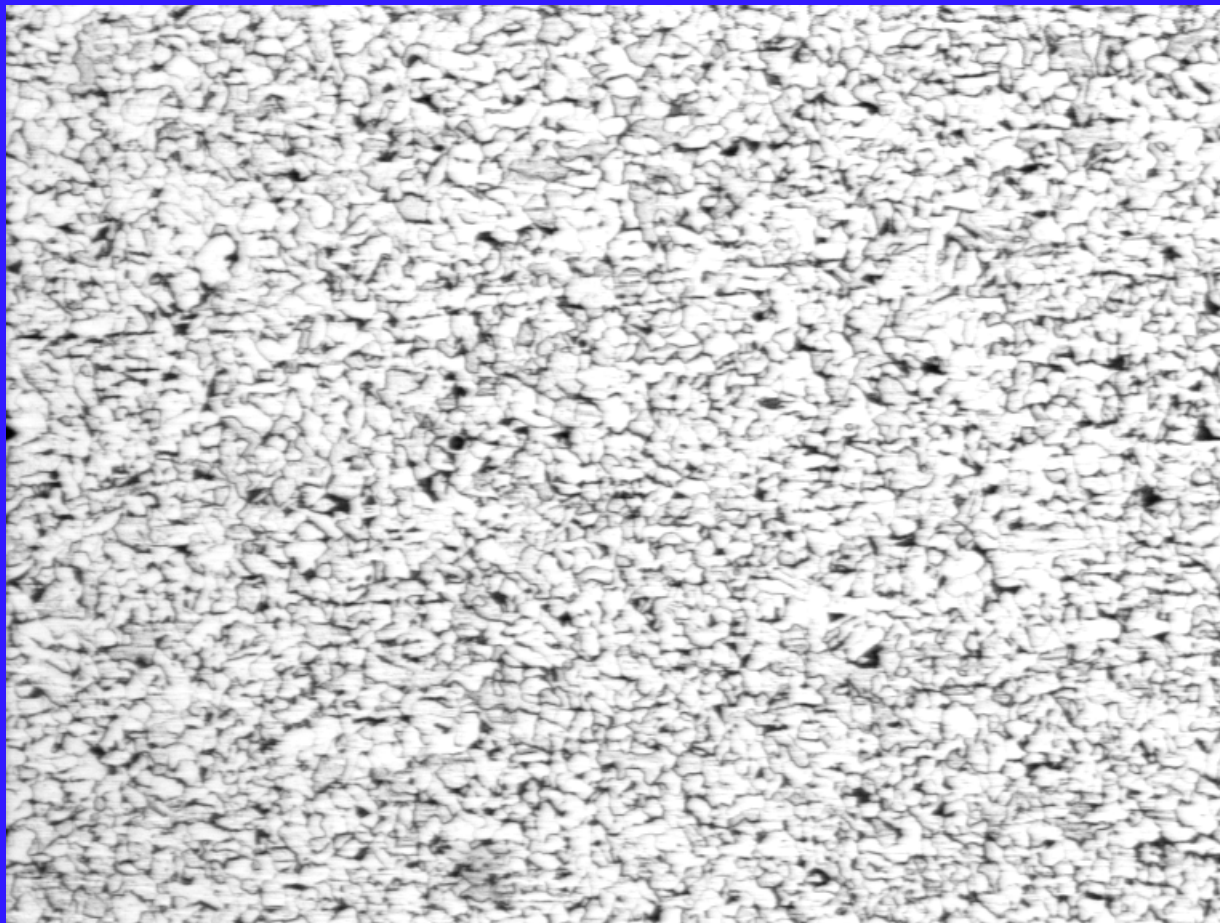
# Procedimentos Experimentais

- Utilização de um aço microligado ao Ti ✓
- Laminação laboratorial:
  - Espessura inicial: 32 mm ✓
  - Espessura final: 9,50 mm ✓
  - Número de passes: 7 (redução média real de 15% por passe) ✓
  - Temperaturas de acabamento: 950 ~ 900 ~ 850°C ✓
  - Temperaturas de bobinamento: 650 ~ 600 ~ 550°C ✓
  - Taxas de resfriamento: 10 ~ 20 ~ 30 ~ 40°C/s ✓
- Ensaios mecânicos: tração e dureza ✓
- Análises Metalográficas ✓

## Parâmetros de Resfriamento e Propriedades Mecânicas

Temp. Acab. (°C)	Taxa de Resf. (°C/s)	Temp. Bob. (°C)	Lim. de Esc. (MPa)	Lim. de Res. (MPa)	Razão Elástica L.E./L.R.	Along. Prop. (%)
900	7,0	650	305	416	0,73	42
900	25	650	336	445	0,75	38
900	11,4	600	333	449	0,74	36
900	26,3	600	335	452	0,74	30
850	8,5	650	310	428	0,72	41
850	21,3	650	312	445	0,70	34
850	13,3	600	328	453	0,72	33
850	19	600	349	463	0,75	34

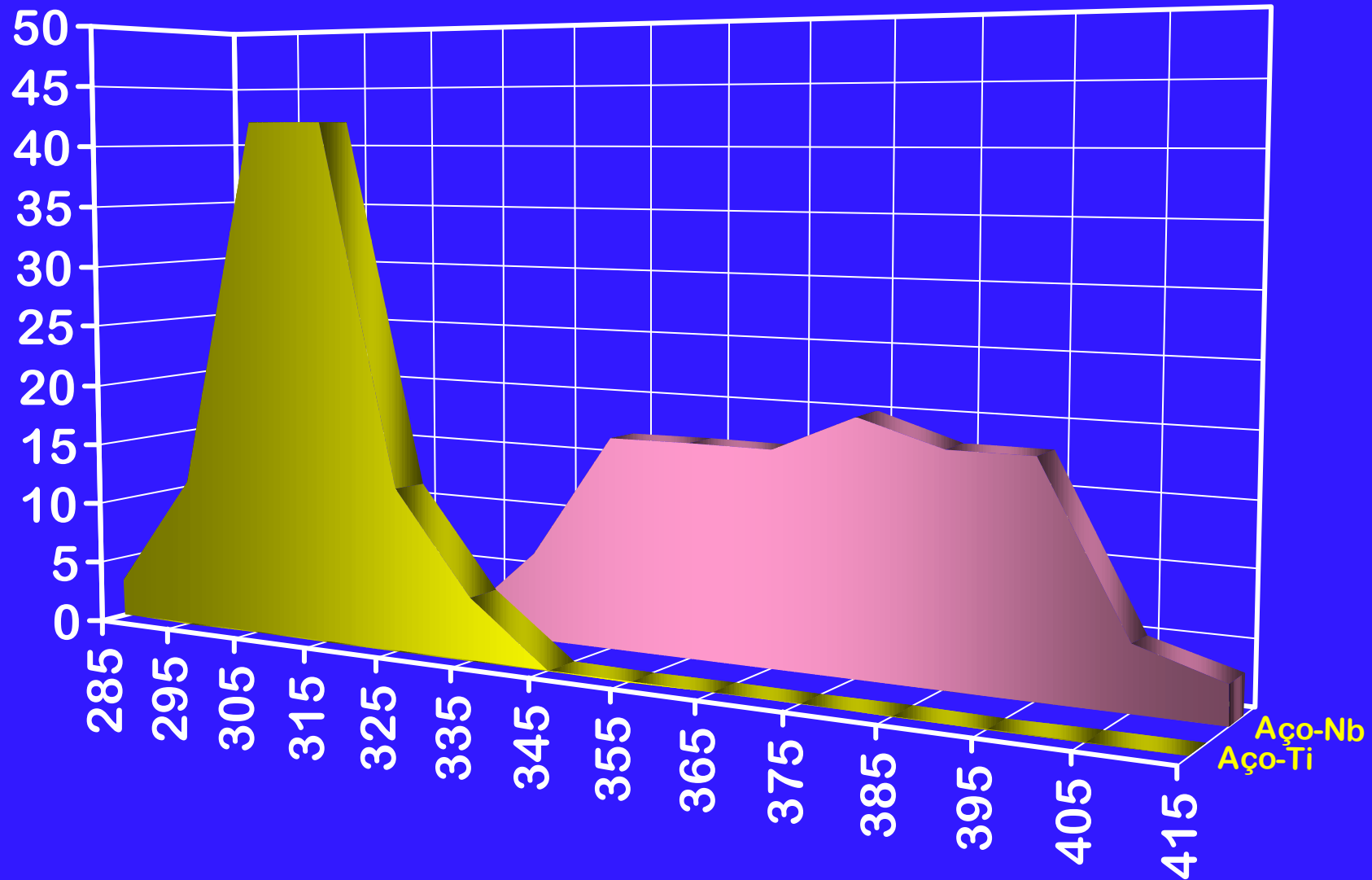
# Metallografia





# Limite de Escoamento do Material Industrial

Gráfico de Frequência



## Conclusões

- ☺ No processo de resfriamento, além das temperaturas de acabamento e bobinamento, a trajetória de resfriamento ao longo da mesa afeta de forma marcante as propriedades das tiras laminadas a quente.
- ☺ Com a utilização de equipamentos de laminação e resfriamento em escala laboratorial é possível avaliar a influência dos diversos parâmetros de processo e obter resultados que podem ser extrapolados para a linha industrial, reduzindo o custo e o prazo de desenvolvimento e melhoria dos aços.

**FIM**