



# ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Francisco Jordão Nunes de Lima; Leonardo Camara Machado; Welles Júnior de Oliveira

16 de maio de 2019



LIGA FERRO CARBONO COM  
TRANSFORMAÇÃO DE FASE

# TRANSFORMAÇÕES DE FASES



O que é uma transformação de fase?

Por que estudar transformações de fases?

É importante o engenheiro ter conhecimento sobre as transformações de fases dos materiais?

# PROCESSO DE TRANSFORMAÇÕES DE FASES

Nucleação

Crescimento

Homogênea

Heterogênea

- Superfícies do recipiente;
- Impurezas insolúveis;
- Contorno dos grãos;
- Discordâncias.

Figura 1: Gráfico esquemático para as contribuições de energia livre em função do raio do embrião/núcleo, no qual são mostrados a variação de energia crítica e o raio do núcleo crítico (CALLISTER Jr., 2012)

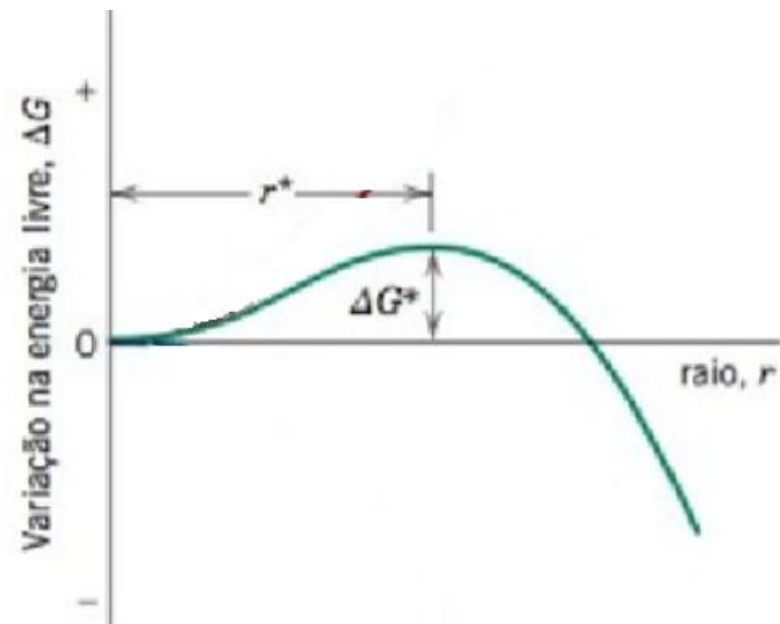
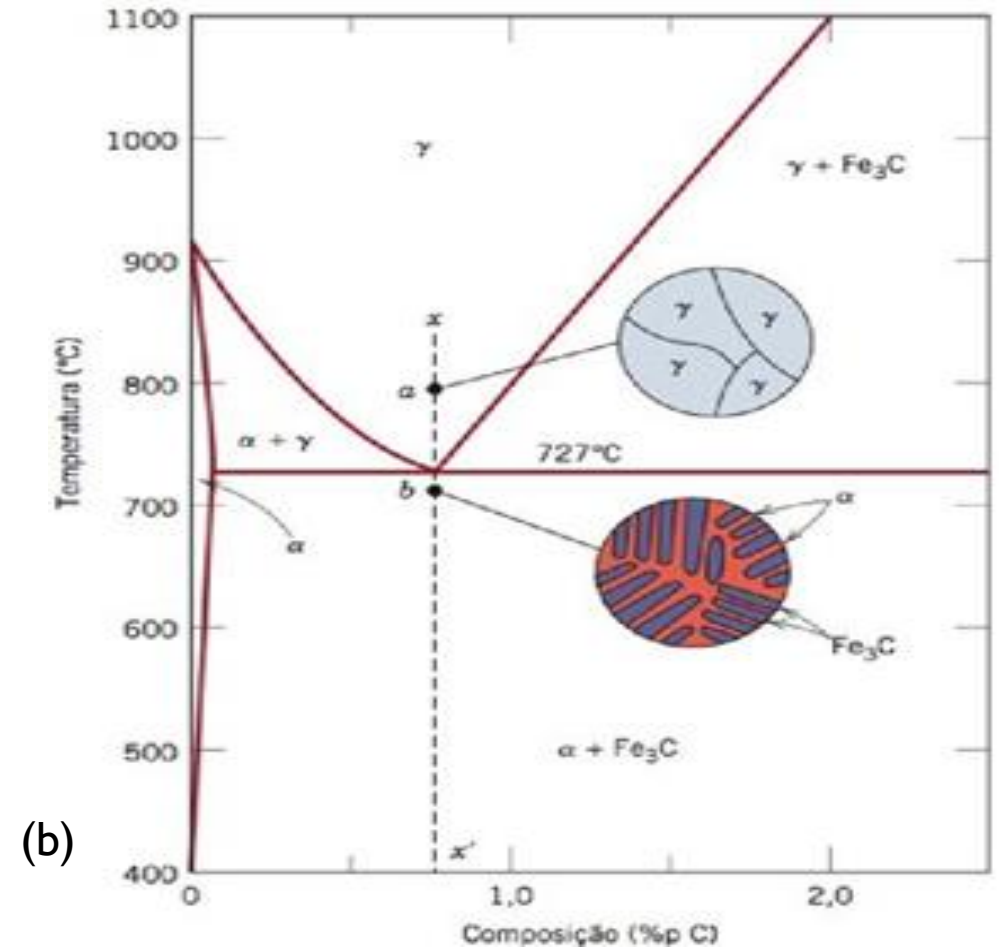
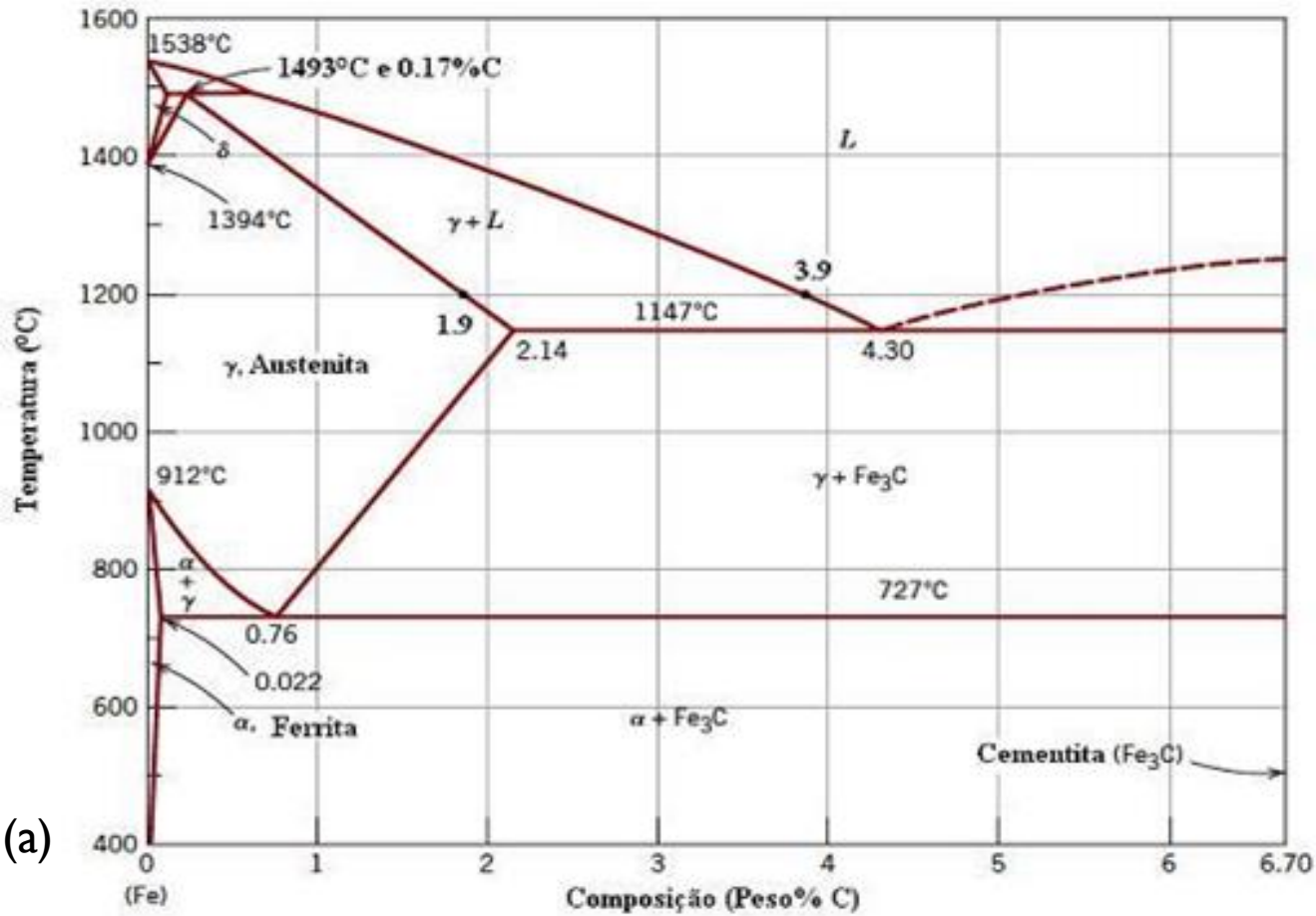


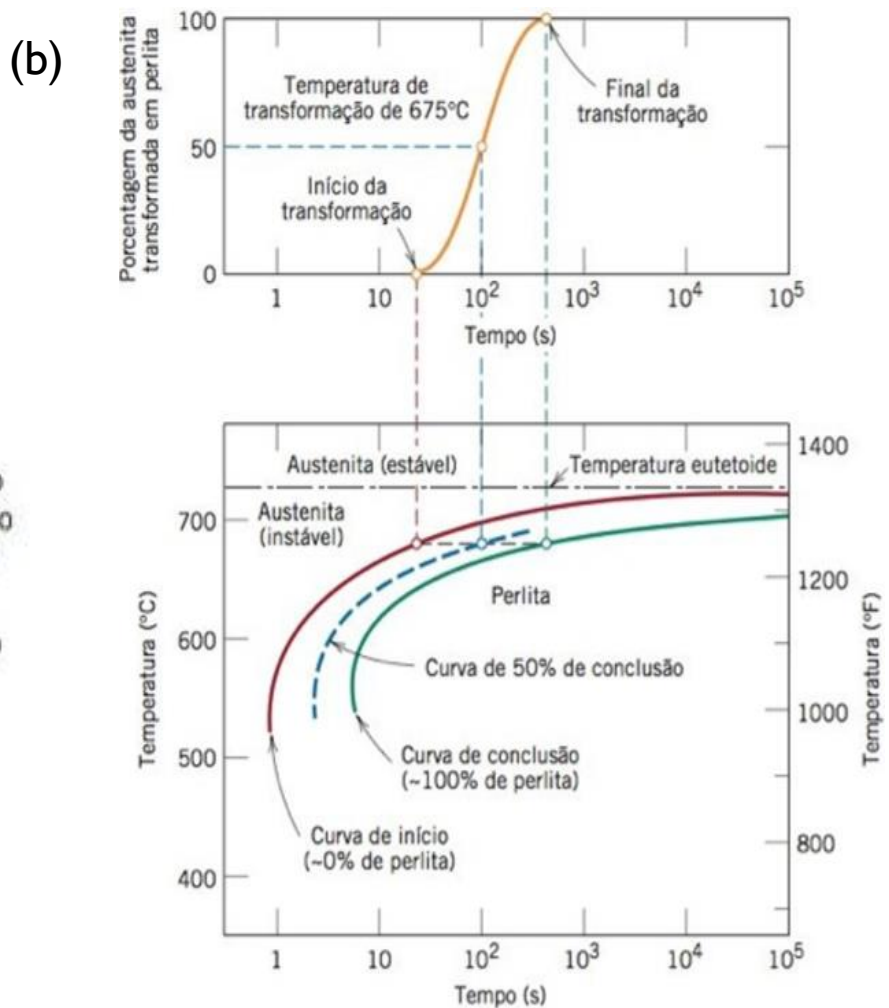
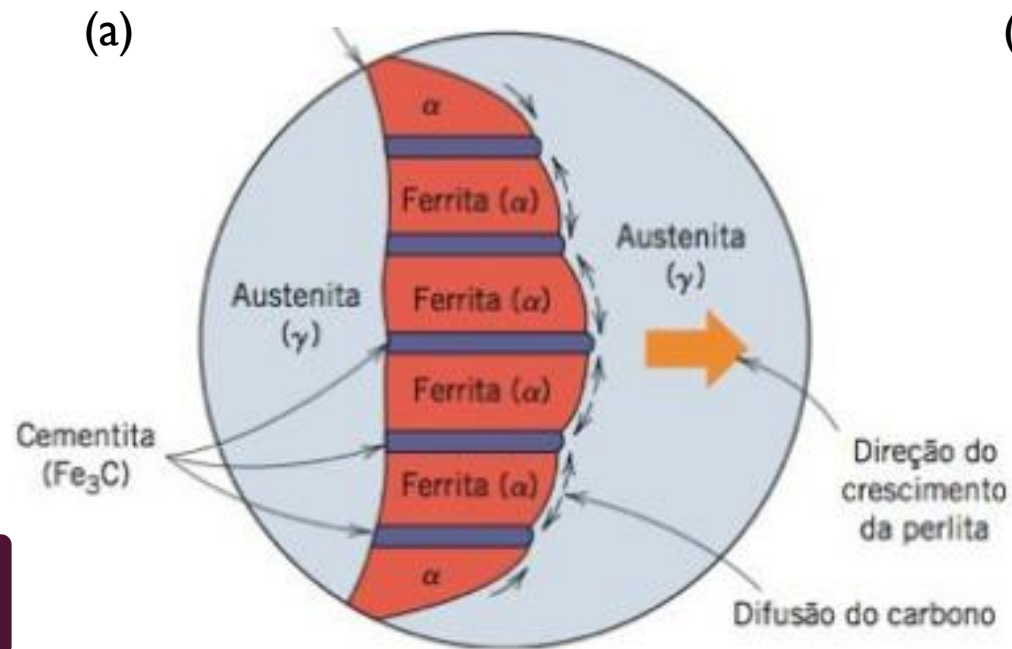
Figura 2: (a) Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro; (b) microestruturas para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide (0,76%p C) acima e abaixo da temperatura eutetóide (CALLISTER Jr., 2012)



Ferro Comercial < 0,008%pC      0,008%pC < Aço < 2,14%pC      2,14%pC < Fe Fundido < 6,7%pC



# FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO DA (A) FORMAÇÃO E (B) TRANSFORMAÇÃO DA AUSTENITA EM PERLITA (CALLISTER JR., 2012)

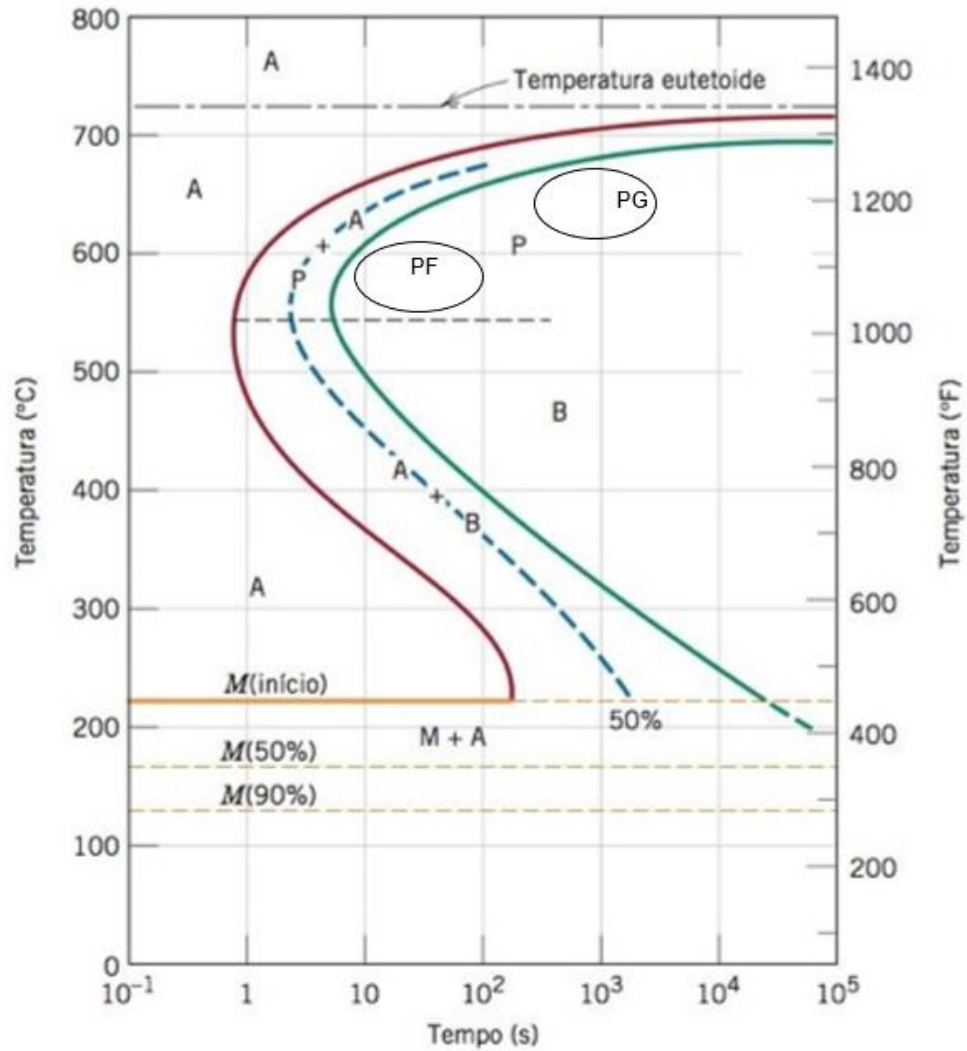


**Perlita**

Ferrita  
( $\alpha$ )

Cimentita  
( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

Figura 4: Diagrama de transformação isotérmica para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide, incluindo as transformações de austenita em perlita (A-P) e austenita em bainita (A-B) (CALLISTER Jr., 2012)



A – Austenita

B – Bainita

M – Martensita

P - Perlita

PF – Perlita fina

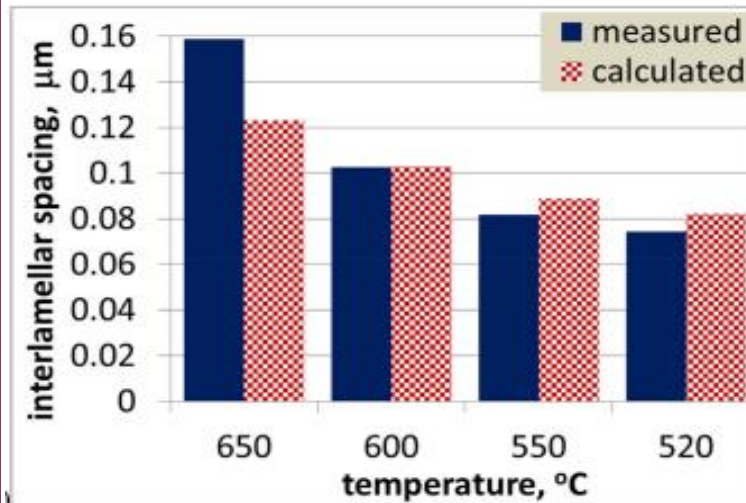
PG – Perlita grossa

# RESUMO DAS MICROESTRUTURAS DE LIGAS FE-C NA CONCENTRAÇÃO EUTETÓICA

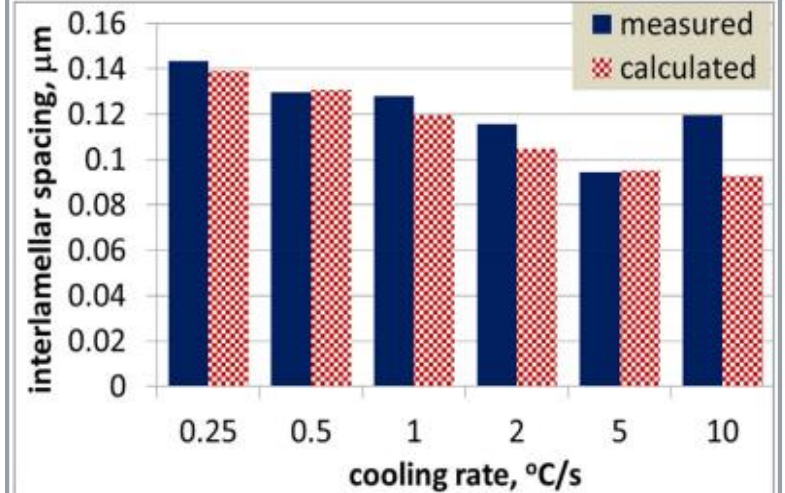
Microconstituente	Arranjo das fases	Propriedades Mecânicas
Perlita fina ( $T \approx 540^\circ \text{C}$ )	Camadas alternadas e finas de ferrita alfa e cementita	dura e resistente
Perlita grossa ( $T \approx 727^\circ \text{C}$ )	Camadas alternadas grossas de ferrita alfa e cementita	Mais dúctil que PF
Bainita ( $240^\circ \text{C} < T < 540^\circ \text{C}$ )	Partículas finas e alongadas de $\text{Fe}_3\text{C}$ em matriz de ferrita alfa	Mais dura e resistente que PF
Martensita ( $120^\circ \text{C} < T < 240^\circ \text{C}$ )	Placas ou agulhas de austenita TCC espalhadas em ferrita alfa	Dura e frágil (por isso tem pouca aplicação)



Figura 5: Espaçamento interlamelar para transformações (a) isotérmicas e (b) taxas constantes de resfriamento (KUZIAK et al., 2019)

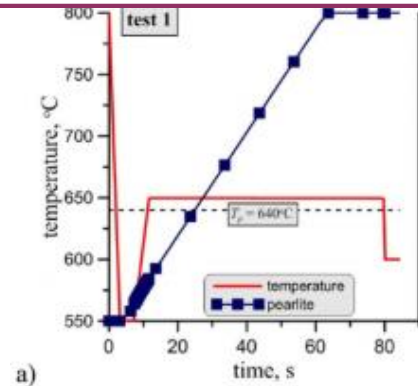
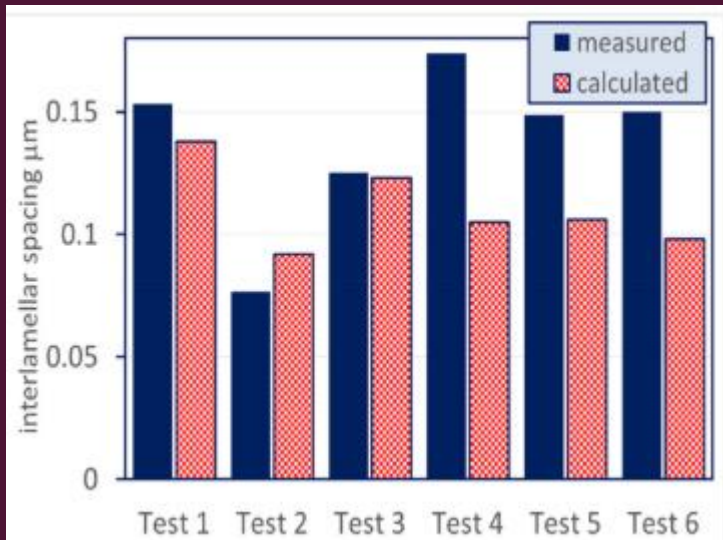


(a)

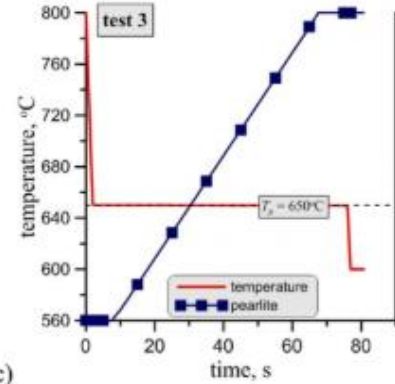


(b)

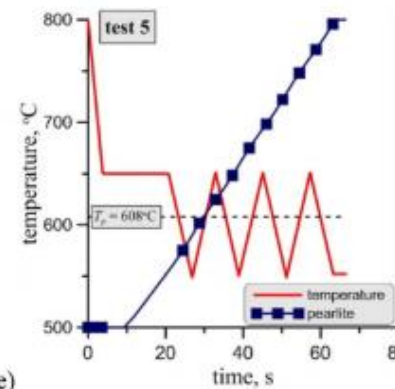
FIGURA 6: CICLOS DE RESFRIAMENTO ALTERNADOS (KUZIAK ET AL., 2019)



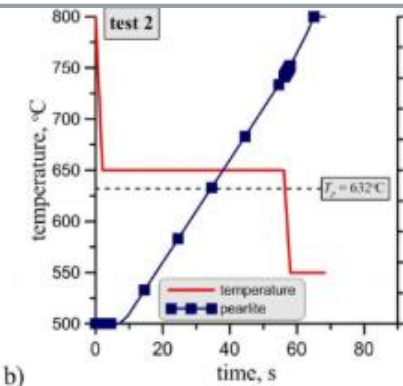
a)



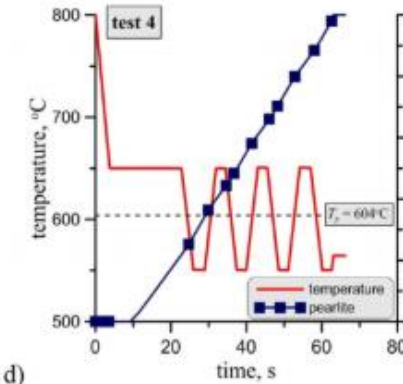
c)



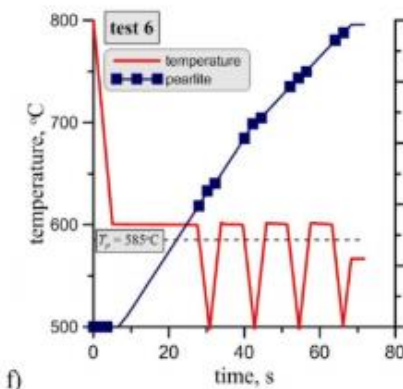
e)



b)



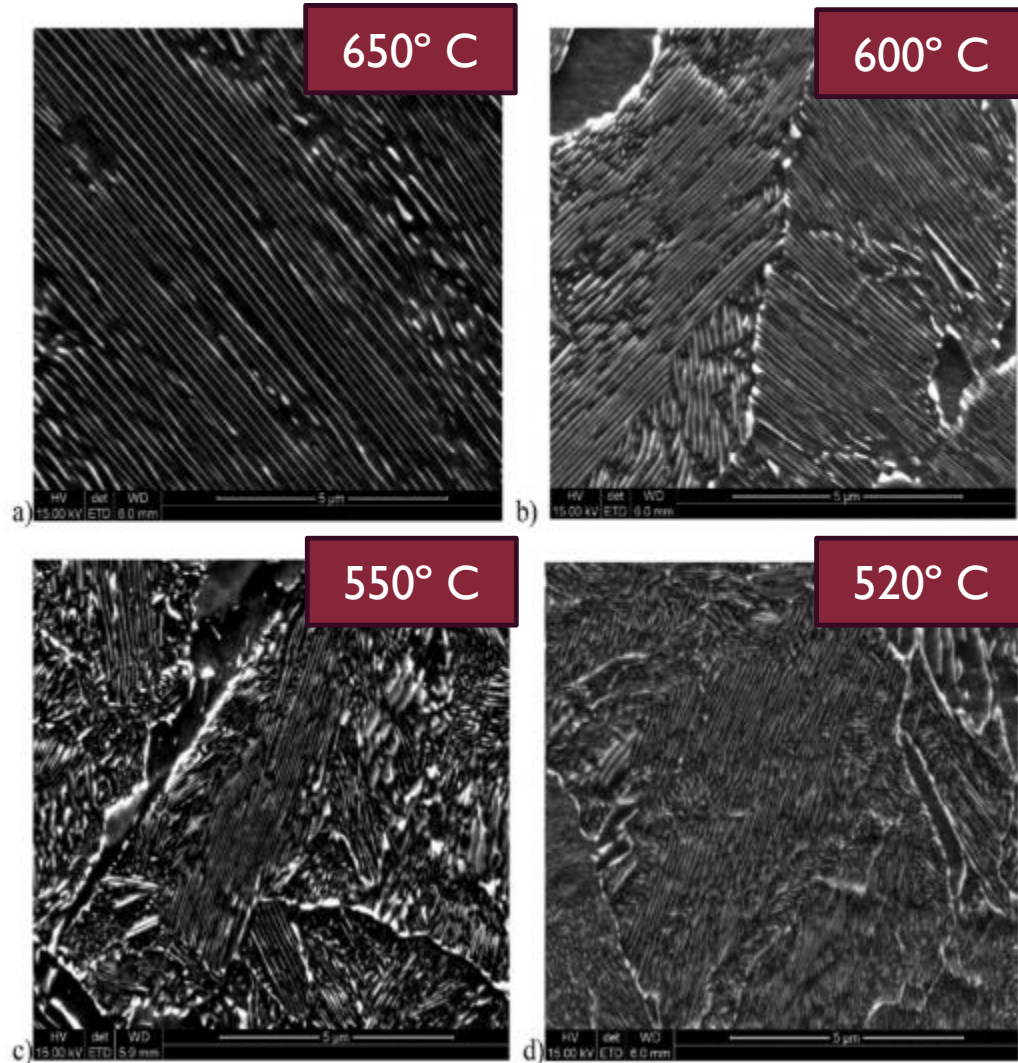
d)



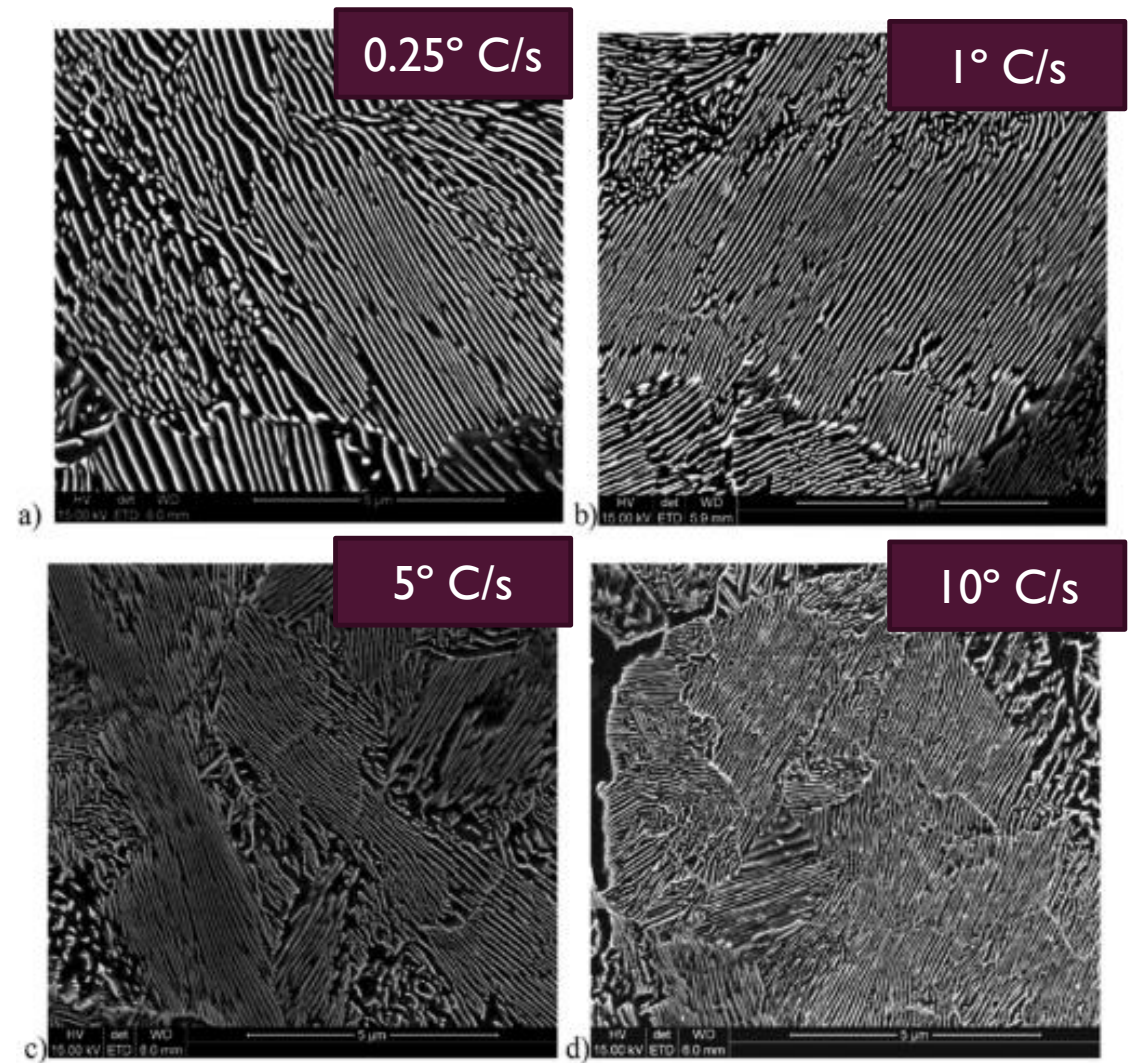
f)

# Interlamellar spacing in the pearlitic steel

Microstructures of samples after isothermal tests

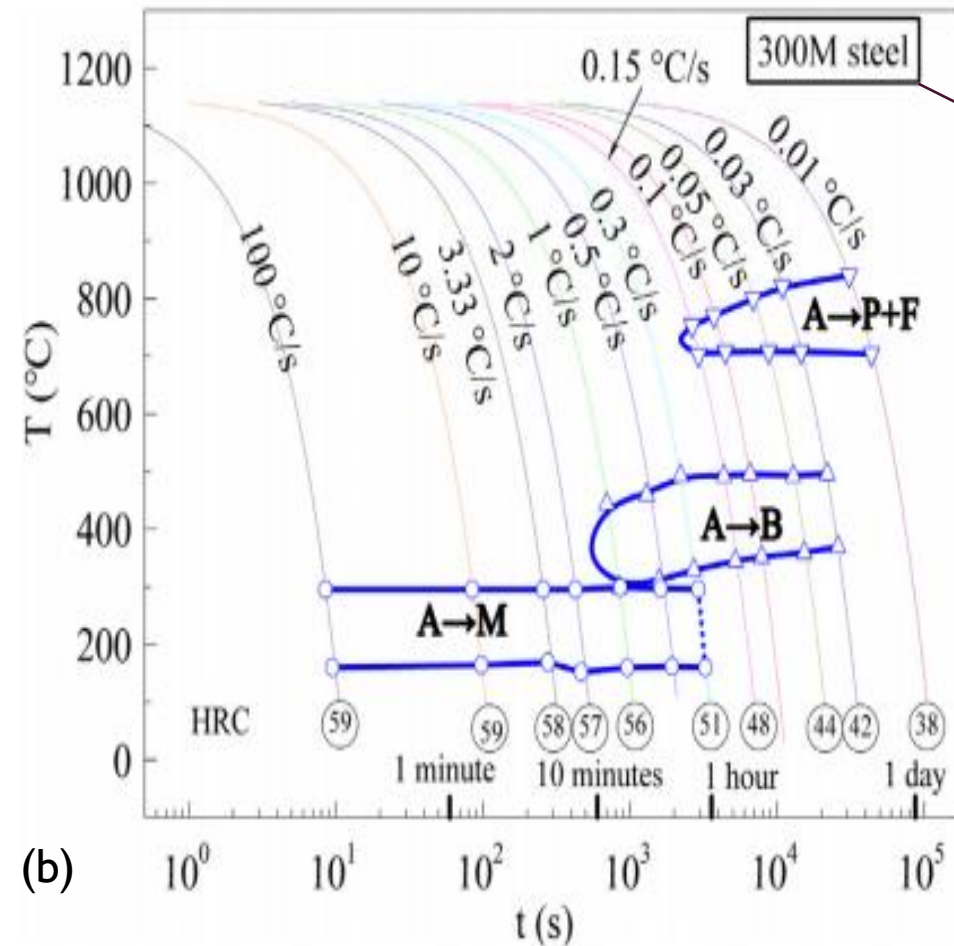
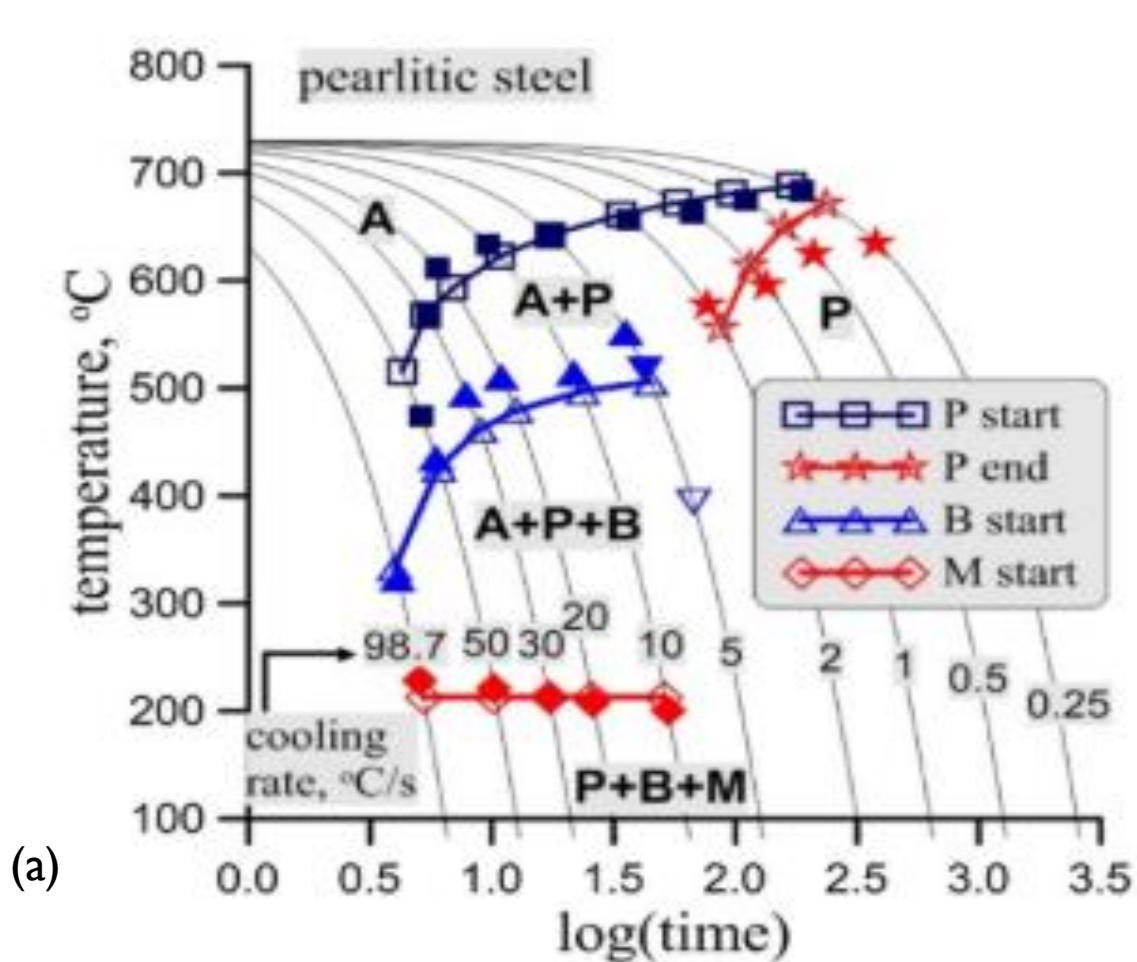


Microstructures of samples after tests with constant cooling rates



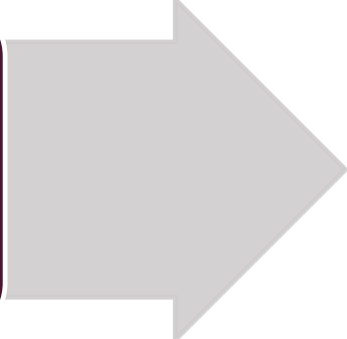
(KUZIAK et al., 2019)

FIGURA 7: DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO CONTÍNUA DE RESFRIAMENTO DE AÇO (A) (KUZIYAK ET AL., 2019) (B) (CHEN, ET AL. 2018)

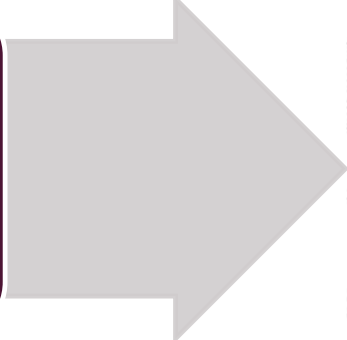


1800 MPa  
(ultra-resistente)

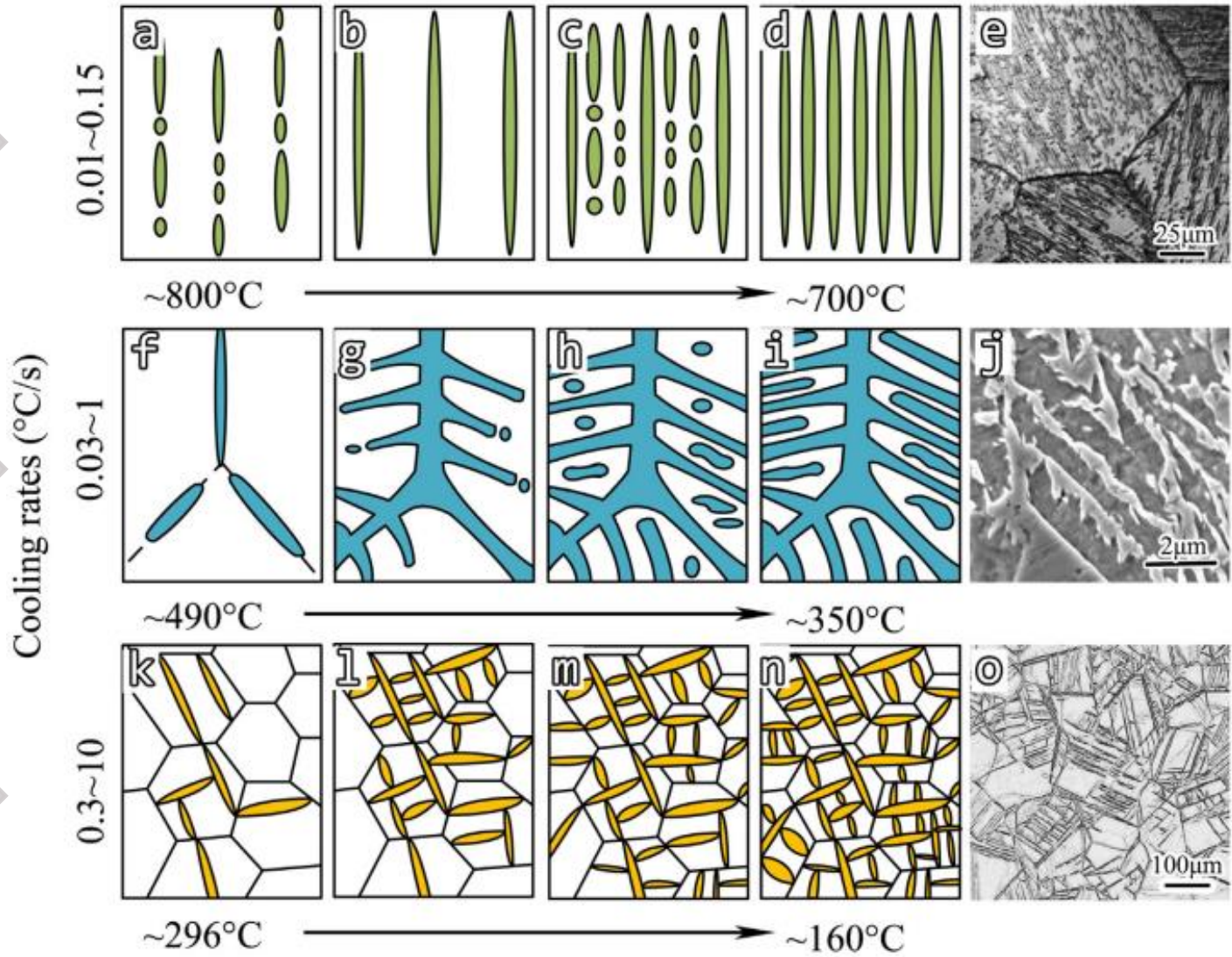
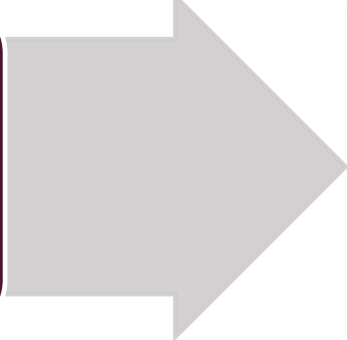
Perlita



Bainita



Martensita



(CHEN, et al. 2018)

# CONCLUSÕES

Composição química e temperatura de tratamento

Microestrutura

Nucleação e crescimento

Propriedades  
mecânicas

Comportamento do material

Desempenho do  
sistema

## REFERÊNCIAS

- CALLISTER Jr, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro. 2012. 8ª Edição.
- CHEN, R.; ZHENG, Z.; LI, N.; LI, J.; FENG, F. In-situ investigation of phase transformation behaviors of 300M steel in continuous cooling process. Materials Characterization, n. 144, p. 400-410, China, 2018.
- KUZIAK, R.; PIDVYSOTS'KYY, V.; PERNACH, M.; RAUCH, L.; ZYGMUNT, T.; PIETRZYK, T. Selection of the best phase transformation model for optimization of manufacturing processes of pearlitic steel rails. Archives of Civil and Mechanical Engineering, n. 19, p. 535-546, Wrocław Poland, 2019.

