

# Têmpera e Partição de Ferros Fundidos Nodulares: Microestrutura e Cinética

1º de outubro de 2018

Arthur Seiji Nishikawa

Orientador: Prof. Hélio Goldenstein

Coorientador: Prof. André Paulo Tschiptschin

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Escola Politécnica - Universidade de São Paulo





# Sumário

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

## Introdução e objetivos

Introdução e objetivos

## Material e métodos

Material e métodos

## Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

## Conclusões



2 Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

# Sumário

## Introdução e objetivos

## Material e métodos

## Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

## Conclusões



3 Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

# Introdução

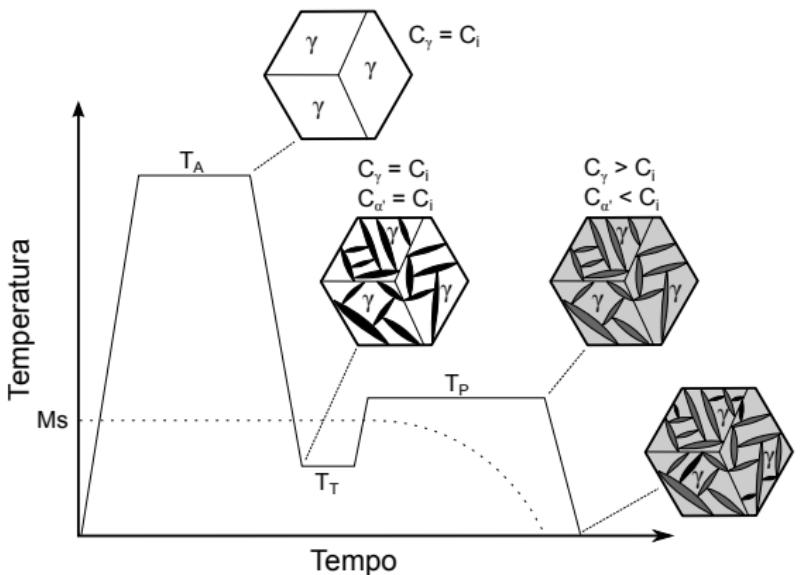
- ▶ O processo de **Têmpera e Partição<sup>1</sup>** (T&P) foi inicialmente proposto como rota de tratamento térmico para obtenção de **microestruturas multifásicas** compostas de martensita e substanciais quantidades de **austenita enriquecida em carbono**
- ▶ A **martensita ( $\alpha'$ )** confere **alta resistência**, enquanto **austenita ( $\gamma$ )** favorece **ductilidade** pela ocorrência do fenômeno de transformação martensítica induzida por deformação (TRIP)

<sup>1</sup> Speer J, Matlock DK, De Cooman BC, Schroth JG. Acta Mater 2003;51:2611.



# Introdução

- Têmpera parcial a  $M_f < T_T < M_s$  para formar quantidade controlada de  $\alpha'$
- Reaquecido até  $T_P$  para redistribuir C de  $\alpha'$  para  $\gamma$  (partição)
- C diminui  $M_s$  de  $\gamma$ , estabilizando-a a temperatura ambiente
- Si e Al adicionados para atrasar precipitação de cementita



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares  
Arthur Nishikawa

## 4 Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

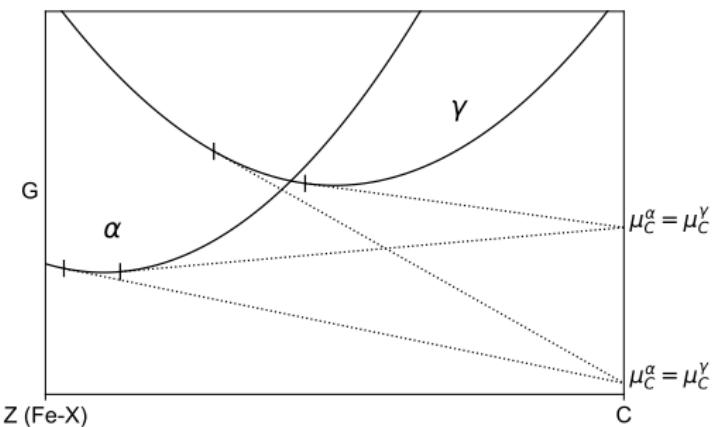
Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



# Introdução

- ▶ A partição de C de  $\alpha'$  para  $\gamma$  é termodinamicamente possível devido à diferença de potenciais químicos ( $\mu_C^{\alpha'} > \mu_C^\gamma$ )
- ▶ Speer propôs que  $\mu_C^{\alpha'}$  e  $\mu_C^\gamma$  se igualam após tratamento T&P
- ▶ Equilíbrio Constrito de Carbono (ECC):  $\mu_C^{\alpha'} = \mu_C^\gamma + \text{interface } \alpha'/\gamma$  fixa



## 5 Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



6 Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

# Introdução

Speer, 2004<sup>1</sup>

- ▶ Speer propôs que o elevado teor de Si utilizado na elaboração de ferros fundidos os faria candidatos ótimos para serem submetido à rota T&P, produzindo microestruturas semelhantes à dos **ferros fundidos austemperados (ADI)**
- ▶ Alunos de graduação da Colorado School of Mines, orientados por Speer, submeteram um ferro fundido nodular à rota T&P e determinaram que o enriquecimento em C de  $\gamma$  foi semelhante ao ADI, mas sua retenção foi significativamente menor

<sup>1</sup> Speer JG, Edmonds D V, Rizzo FC, Matlock DK. Curr Opin Solid State Mater Sci 2004;8:219.



Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

# Introdução

## Dissertação de Anderson J. S. T. Silva<sup>1</sup>

- ▶ Duas ligas comerciais de ferro fundido nodular com alto manganês ( $> 0,5\%$ ) → intensa segregação para contornos de célula eutética
- ▶ T&P para diferentes tempos e temperaturas de partição;  $T_T$  fixo
- ▶ Microestrutura composta de  $\alpha'$  particionada e grandes quantidades de **ausferrita** (ferrita bainítica  $[\alpha_b] + \gamma$ ), mesmo microconstituinte obtido no ADI
- ▶ Identificação de **janela de processo** similar ao ADI, cujo fim é associado ao 2º estágio da reação bainítica

<sup>1</sup> Silva AJST. Têmpera E Partição de Ferros Fundidos Nodulares. Dissertação (Mestrado). EPUSP, 2013.



8 Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

Esse trabalho faz parte de um projeto maior que objetiva:

1. Demonstrar a viabilidade da rota T&P aplicada a ferros fundidos (dissertação de mestrado de Anderson J. S. T. Silva, 2013)
2. **Compreender as transformações de fases envolvidas, o entendimento de suas respectivas cinéticas e microestruturas obtidas (presente trabalho)**
3. Medir as propriedades mecânicas do produto (tese doutorado de André Caetano Melado)



# Sumário

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares  
Arthur Nishikawa

## Introdução e objetivos

Introdução e objetivos

9 Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

## Material e métodos

## Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

## Conclusões



# Material e métodos

Liga estudada

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

10 Material e métodos

Resultados e discussão

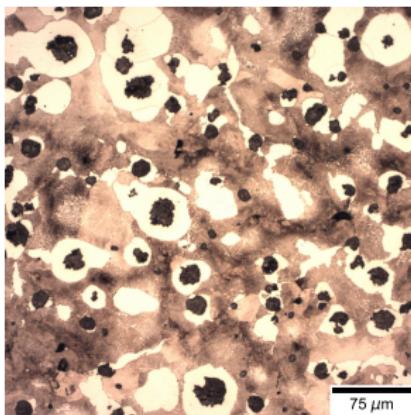
Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



- ▶ Liga fundida como blocos em "Y" na Tupy Fundições S.A.
- ▶ 3,5%C, 2,5%Si, **0,2%Mn**, 0,4%Cu;  
impurezas (P + S + Cr < 0,1%)
- ▶ Inoculação: > 400 nódulos/mm<sup>2</sup>



# Material e métodos

## Dilatometria

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

11 Material e métodos

Resultados e  
discussão

Características  
microestruturais pré etapa  
de partição

Caracterização  
microestrutural das  
amostras T&P

Cinética das  
transformações de fases  
durante T&P

Modelo computacional de  
redistribuição de carbono

Conclusões

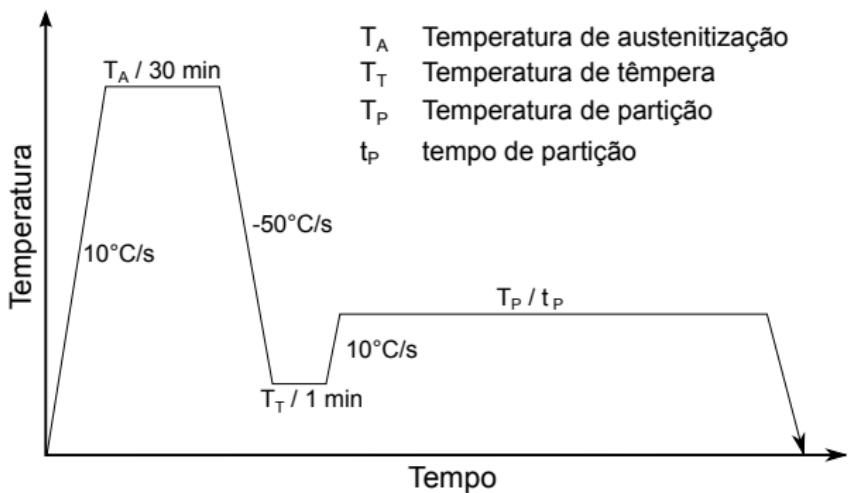
- ▶ Dilatômetro Bähr 805A, aquecimento por indução & resfriamento gás He → controle acurado de temperatura
- ▶ CP cilíndrico Ø4mm, L = 10mm
- ▶ Aquisição em tempo real da dilatação da amostra → cinética de transformação



# Material e métodos

## Dilatometria

- $T_A = 880^\circ\text{C}$  no campo  $\gamma +$  grafita. Thermo-Calc®  $\rightarrow 0,76\% \text{C em } \gamma$
- $T_T = 140, 170 \text{ e } 200^\circ\text{C}$
- $T_P = 300, 375 \text{ e } 450^\circ\text{C}$
- $t_P = 0, 30 \text{ s, 5 min, 15 min, 2 h}$





# Difração de raios X in situ

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

13 Material e métodos

Resultados e discussão

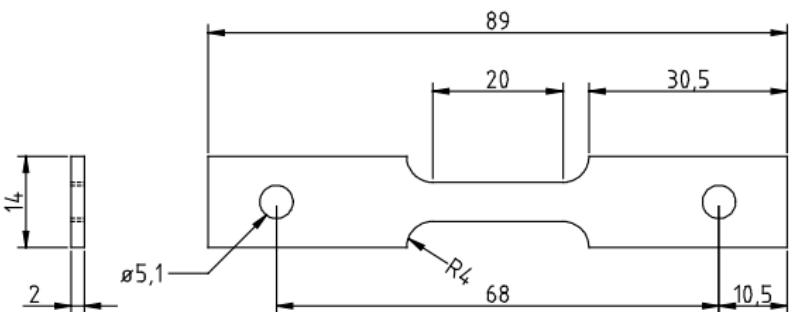
Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

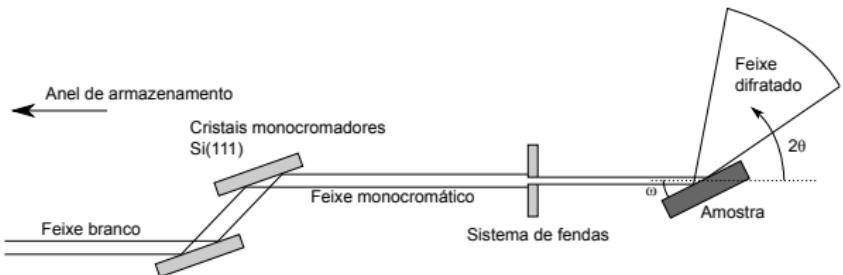




# Material e métodos

## DRX in situ

- ▶  $T_T = 170^\circ\text{C}$
- ▶  $T_P = 300, 375, 450^\circ\text{C} / 2\text{ h}$
- ▶ Energia do feixe:  $12\text{ keV} \rightarrow \lambda = 1,033\text{ \AA}$
- ▶ Geometria  $\omega - 2\theta$ ;  $\omega$  fixo em  $15^\circ$
- ▶ Dois detetores multicanal Mythen 1K com 1280 pixels cada
- ▶ Aquisições: detetores posicionados a  $31^\circ \rightarrow 26^\circ - 47^\circ$  (picos (111) e (200) de  $\gamma$  e (110) e (200) de  $\alpha$ ); acq. feitas a cada 3,5 s



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

14 Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



# Material e métodos

DRX in situ

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

15 Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

$$\frac{a^\gamma}{a_0^\gamma} = 1 + B_\gamma T + B_\gamma \Theta_D^\gamma \left[ \exp\left(-\frac{T}{\Theta_D^\gamma}\right) \right]$$

$$a^\gamma = 3,5780 + 3,30 \cdot 10^{-2} \% w_C^\gamma + 9,5 \cdot 10^{-4} \% w_{Mn}^\gamma + 1,5 \cdot 10^{-3} \% w_{Cu}^\gamma$$

<sup>1</sup> Stock S, Cullity B. Elements of X-ray diffraction. Prentice Hall, New Jersey, 2001

<sup>2</sup> van Bohemen SMC. Scr Mater 2013;69:315.

<sup>3</sup> Dyson DJ, Holmes B. J Iron Steel Inst 1970;208:469.



16 Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

- ▶ **MO:** Olympus BX60M (PMT-USP) e microscópio Nikkon (Tohoku University)
- ▶ **MEV:** MEV-FEG FEI Inspect F50 (PMT-USP) e JEOL JSM-7001F (Tohoku University)
  - ▶ Preparação metalográfica convencional por lixamento e polimento até sílica coloidal
  - ▶ MO e MEV: Ataque metalográfico com reagente Nital 2%
- ▶ **EBSD** (difração de elétrons retroespelhados): JEOL JSM-7001F com sistema TSL OIM (Tohoku University)
- ▶ **EPMA** (microssonda eletrônica): JEOL JXA-FE-8530 (IGc-USP)
  - ▶ Baixo aumento: análise composicional de Mn, Si e Cu (C é estimado usando termodinâmica computacional)
  - ▶ Alto aumento: análise composicional de C



# Material e métodos

## Difração de raios X de alta resolução

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares  
Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

17 Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

- ▶ DRX síncrotron feita na XTMS, mas sem tratamento térmico
- ▶ Detetor 2D Rayonix SX165: alta resolução, alto sinal/ruído → Caracterização de carbonetos
- ▶ Dados integrados azimutalmente → difratograma 1D



# Sumário

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

## 18 Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

Material e métodos

## Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



# Sumário

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

**Características microestruturais pré etapa de partição**

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e  
discussão

19  
Características  
microestruturais pré etapa  
de partição

Caracterização  
microestrutural das  
amostras T&P

Cinética das  
transformações de fases  
durante T&P

Modelo computacional de  
redistribuição de carbono

Conclusões



# Transformação martensítica

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e  
discussão

20

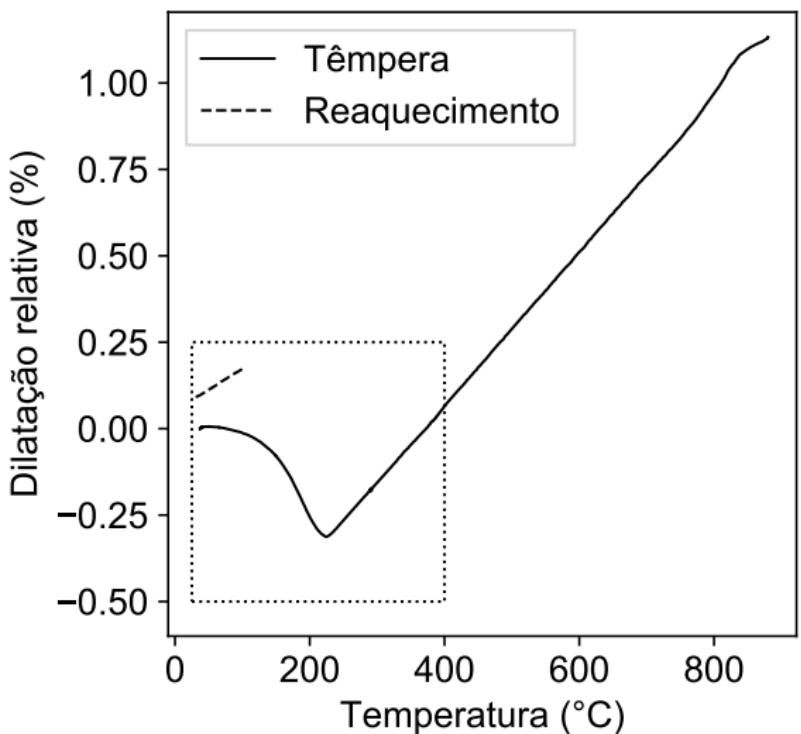
Características  
microestruturais pré etapa  
de partição

Caracterização  
microestrutural das  
amostras T&P

Cinética das  
transformações de fases  
durante T&P

Modelo computacional de  
redistribuição de carbono

Conclusões





# Transformação martensítica

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e  
discussão

20

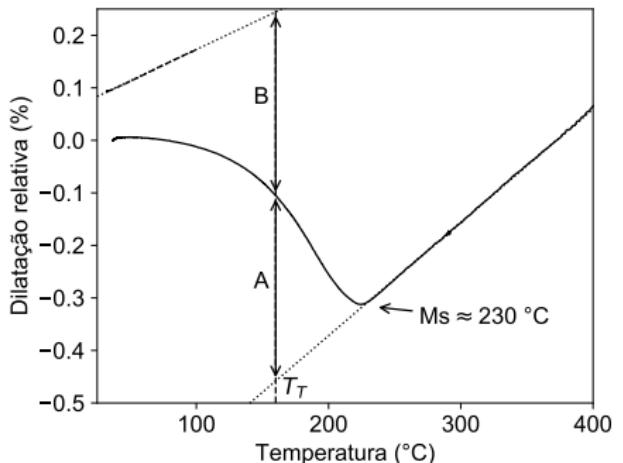
Características  
microestruturais pré etapa  
de partição

Caracterização  
microestrutural das  
amostras T&P

Cinética das  
transformações de fases  
durante T&P

Modelo computacional de  
redistribuição de carbono

Conclusões



Regra das alavancas:

$$f^{\alpha'} = 1 - f^{\gamma} = \frac{A}{A + B}$$

72



# Transformação martensítica

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e  
discussão

21

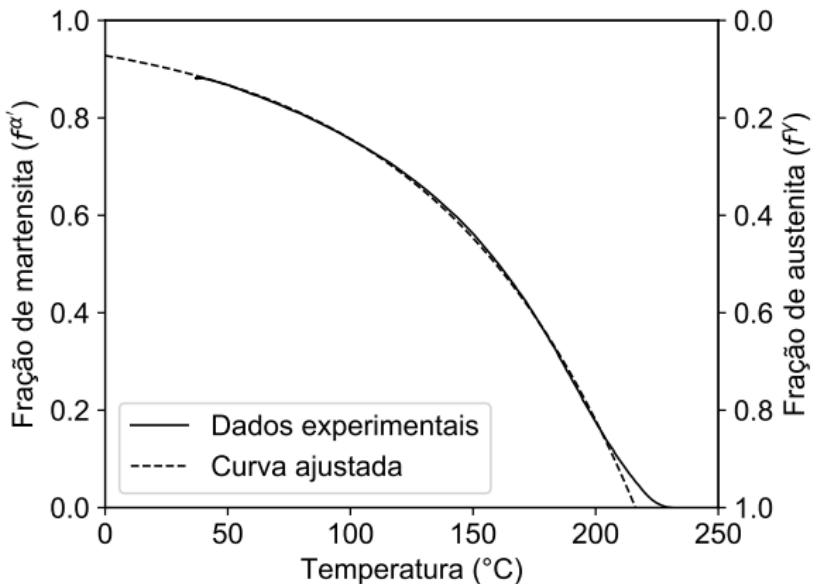
Características  
microestruturais pré etapa  
de partição

Caracterização  
microestrutural das  
amostras T&P

Cinética das  
transformações de fases  
durante T&P

Modelo computacional de  
redistribuição de carbono

Conclusões



72



# Transformação martensítica

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

21

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

$$f^{\alpha'} = 1 - f^{\gamma} = 1 - \exp \left[ -1,217 \times 10^{-2} (216,2 - T_T) \right]$$

$T_T$ (°C)	$f^{\alpha'}$ (% vol)	$f^{\gamma}$ (% vol)
25	90,2	9,8
140	60,4	39,6
170	43,0	57,0
200	17,9	82,1

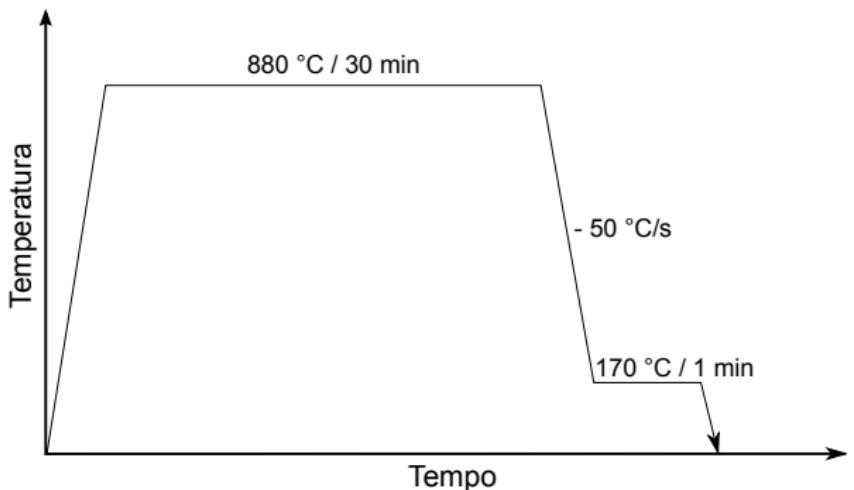


# Transformação martensítica

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

$$T_T = 170 \text{ } ^\circ\text{C}/1 \text{ min} \quad (f^{\alpha'} = 43,0\%)$$



22

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

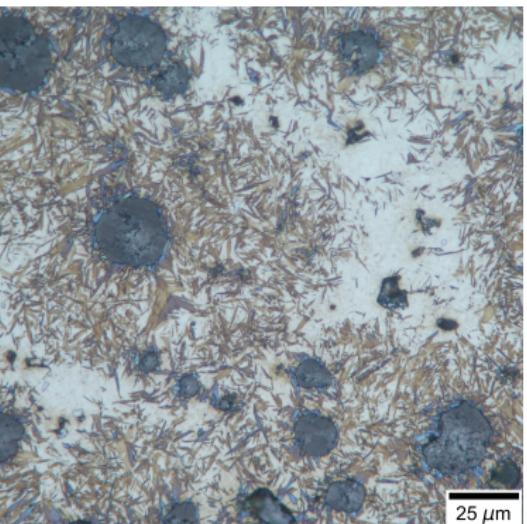
Conclusões



# Transformação martensítica

$$T_T = 170 \text{ } ^\circ\text{C}/1 \text{ min} \quad (f_{\alpha'} = 43,0\%)$$

- ▶ Martensita levemente revenida → atacada pelo Nital
- ▶ Áreas brancas / alto relevo: **austenita ( $\gamma$ )** não transformada após  $170 \text{ } ^\circ\text{C}/1 \text{ min}$  → transforma-se parcialmente em **martensita fresca ( $\alpha'_{fr}$ )** durante resfriamento final
- ▶  $\alpha'_{fr} + \gamma$ : **MA**



23

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

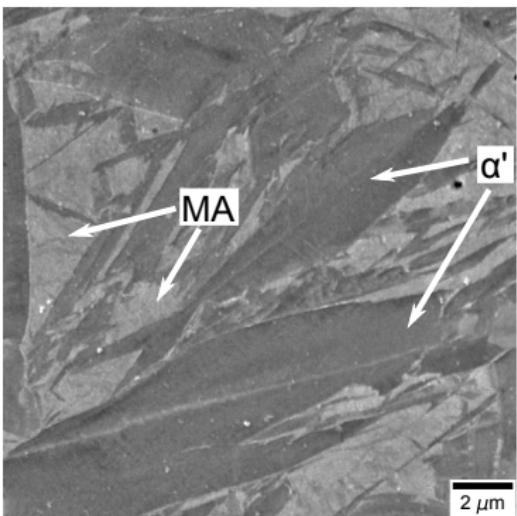
Conclusões



# Transformação martensítica

$$T_T = 170 \text{ } ^\circ\text{C}/1 \text{ min} \quad (f^{\alpha'} = 43,0\%)$$

- ▶ Martensita levemente revenida → atacada pelo Nital
- ▶ Áreas brancas / alto relevo: **austenita ( $\gamma$ )** não transformada após  $170 \text{ } ^\circ\text{C}/1 \text{ min}$  → transforma-se parcialmente em **martensita fresca ( $\alpha'_{fr}$ )** durante resfriamento final
- ▶  $\alpha'_{fr} + \gamma$ : **MA**



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

23 Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

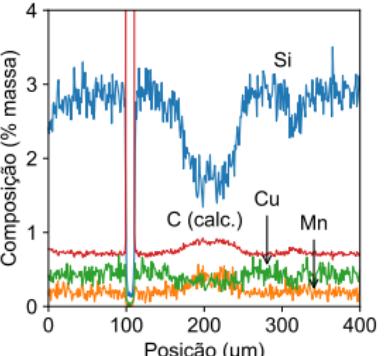
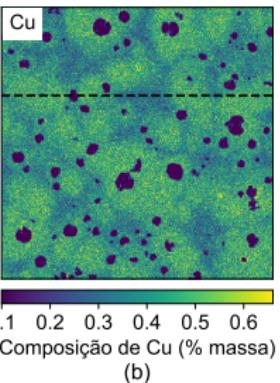
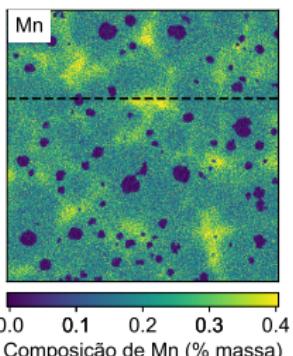
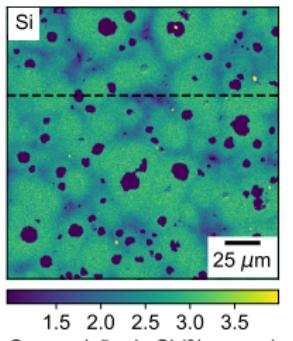
Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



# Microssegregação

- EPMA: composição medida de Mn, Si e Cu
- C calculado assumindo potencial químico homogêneo a 880 °C



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares  
Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

24

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



# Distribuição esperada da martensita

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e  
discussão

25

Características  
microestruturais pré etapa  
de partição

Caracterização  
microestrutural das  
amostras T&P

Cinética das  
transformações de fases  
durante T&P

Modelo computacional de  
redistribuição de carbono

Conclusões

Ms calculado ponto a ponto:

$$\text{Ms} (\text{°C}) = 565 - 600 [1 - \exp(-0.96w_C^\gamma)] - 31w_{\text{Mn}}^\gamma - 13w_{\text{Si}}^\gamma$$

A partir do Ms calculado, é determinada  $f^{\alpha'}$  ponto a ponto pela equação de Koistinen-Marburger:

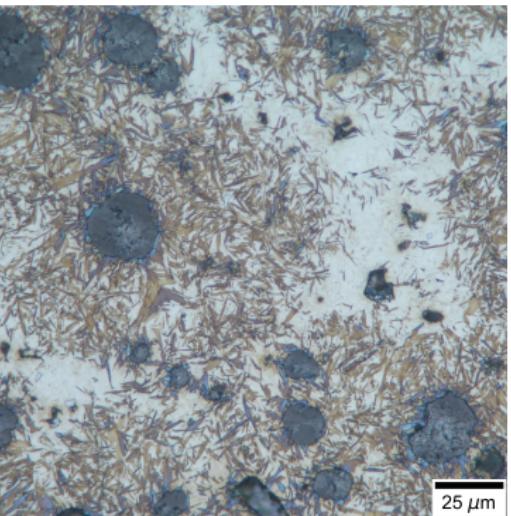
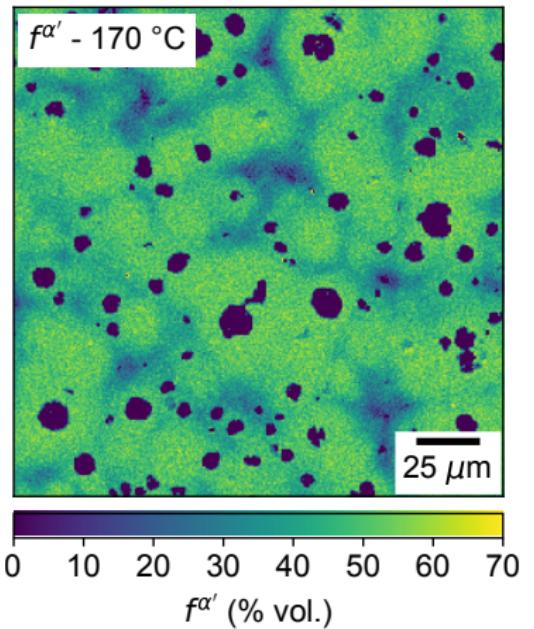
$$f^{\alpha'} = 1 - \exp[-1,217 \times 10^{-2} (\text{Ms} - T_T)]$$

72



# Distribuição esperada da martensita

$T_T = 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

26 Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

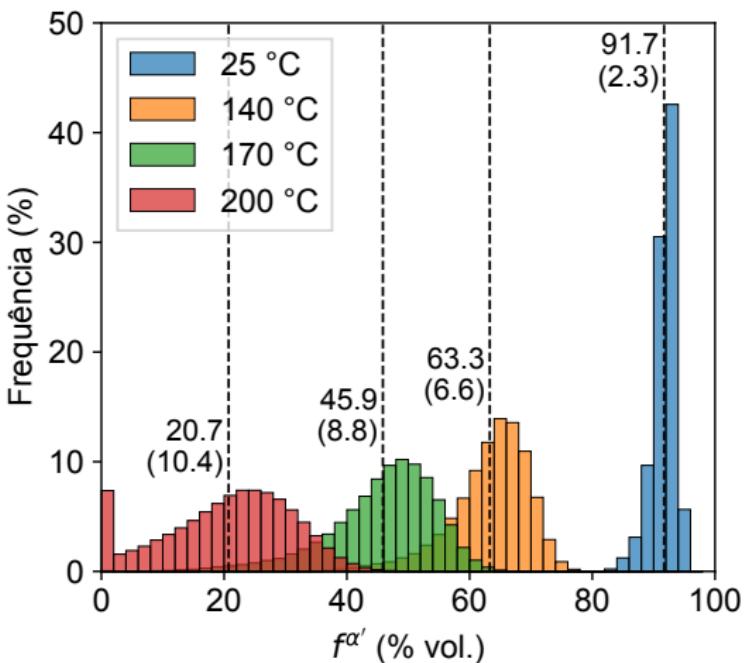
Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



# Distribuição esperada da martensita

- $T_T = 25, 140, 170, 200 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Histogramas da distribuição de  $f^{\alpha'}$  calculada pelo método anterior
- Distribuição de martensita fica mais homogênea quanto a temperatura de têmpera é diminuída.



27

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

72



# Sumário

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Introdução e objetivos

Material e métodos

Material e métodos

Resultados e discussão

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Características  
microestruturais pré etapa  
de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Caracterização  
microestrutural das  
amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Cinética das  
transformações de fases  
durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Modelo computacional de  
redistribuição de carbono

Conclusões

Conclusões

28

72

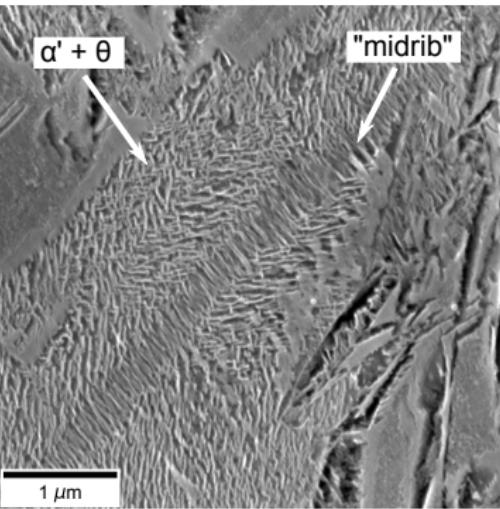
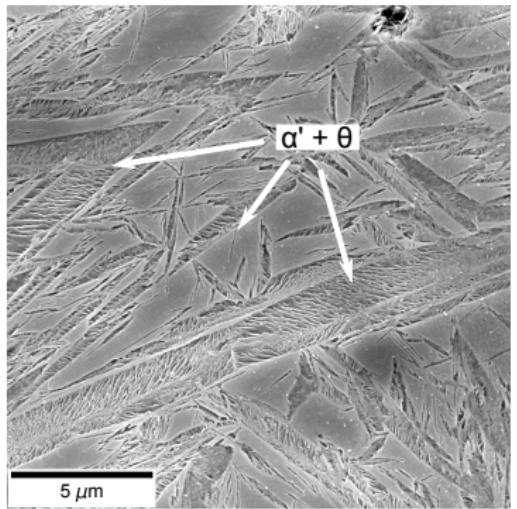


# Microestruturas T&P

Efeito do tempo de partição ( $t_P$ )

$$T_T = 170 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_P = 375 \text{ }^{\circ}\text{C} / 0$$

- ▶ Padrão de ataque releva carbonetos ( $\theta$ ) no tempo mais curto
- ▶  $\theta$  portanto se forma no aquecimento de  $T_T$  a  $T_P$



29

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

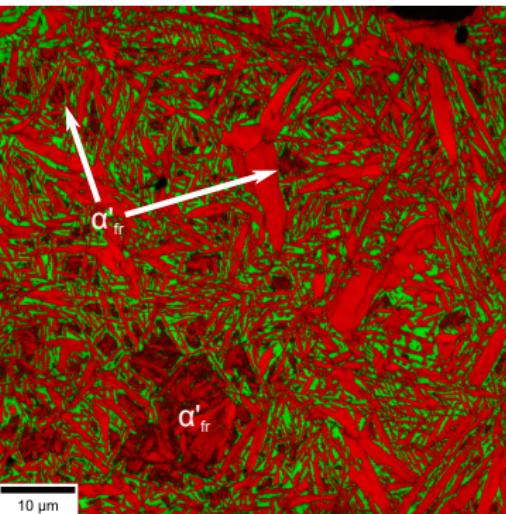
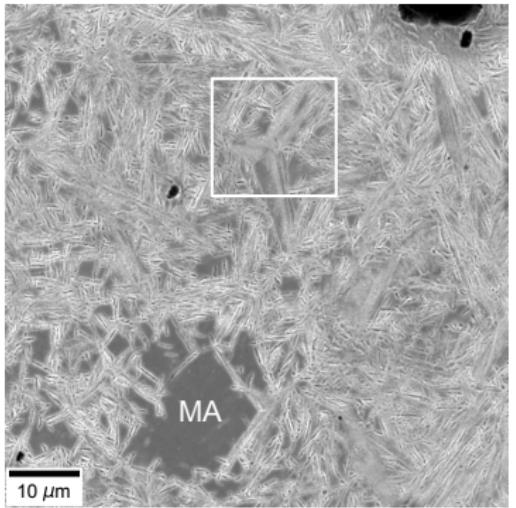
Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



$T_T = 170^\circ\text{C}$ ;  $T_P = 375^\circ\text{C} / 30\text{ s}$

- ▶ EBSD mostra austenita ( $\gamma$ ) estabilizada
- ▶ Bainita não é acompanhada por carbonetos: ferrita bainítica ( $\alpha'_b$ )
- ▶  $\gamma$  próxima da martensita: evidência de partição!



30

T&P de Ferros Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

72

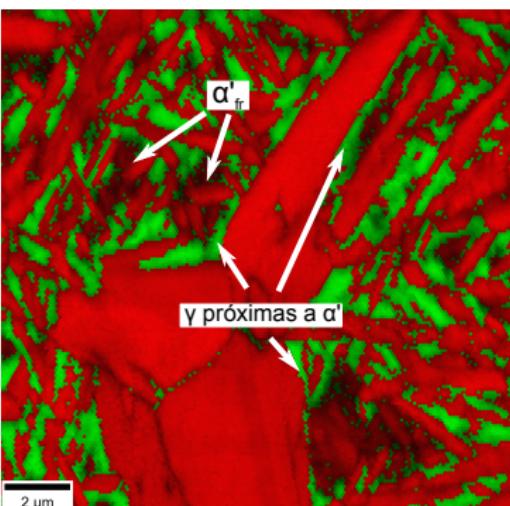
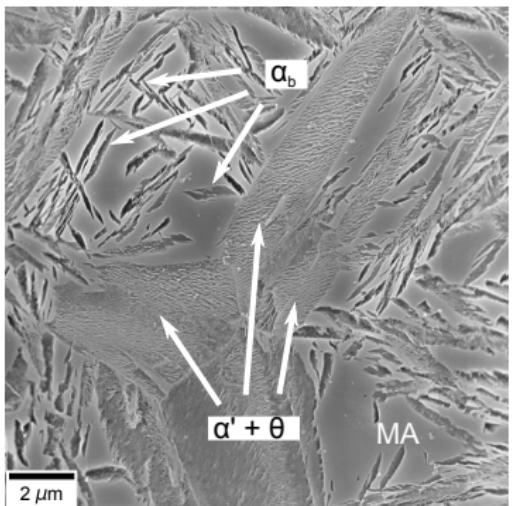


# Microestruturas T&P

Efeito do tempo de partição ( $t_P$ )

$T_T = 170^\circ\text{C}$ ;  $T_P = 375^\circ\text{C} / 30\text{ s}$

- ▶ EBSD mostra austenita ( $\gamma$ ) estabilizada
- ▶ Bainita não é acompanhada por carbonetos: ferrita bainítica ( $\alpha_b$ )
- ▶  $\gamma$  próxima da martensita: evidência de partição!



30

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

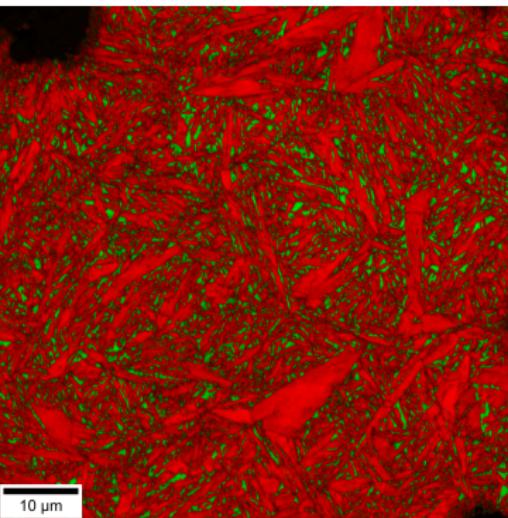
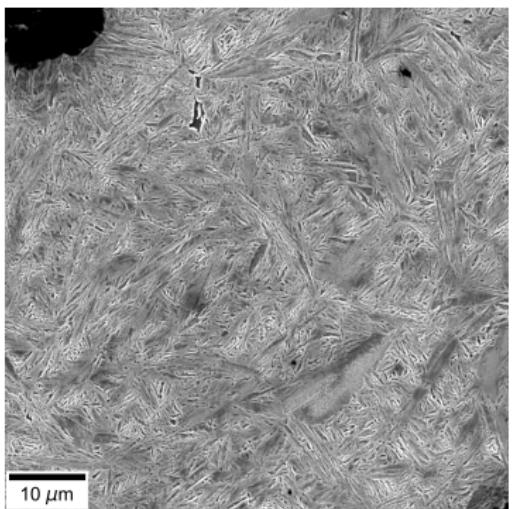
Conclusões



# Microestruturas T&P

Efeito do tempo de partição ( $t_P$ )

$T_T = 170^\circ\text{C}$ ;  $T_P = 375^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

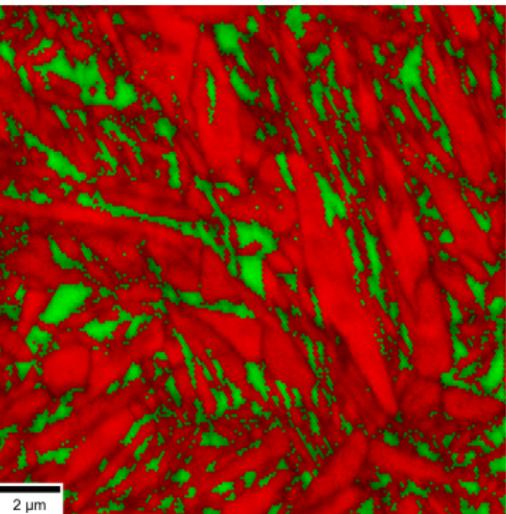
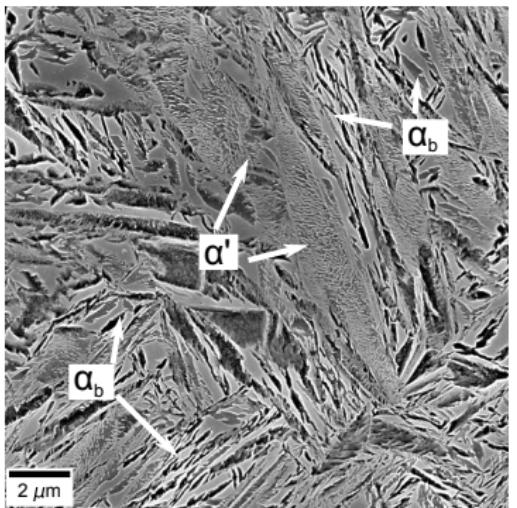
31



# Microestruturas T&P

Efeito do tempo de partição ( $t_P$ )

$T_T = 170^\circ\text{C}$ ;  $T_P = 375^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

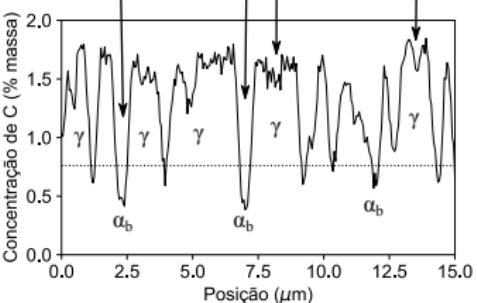
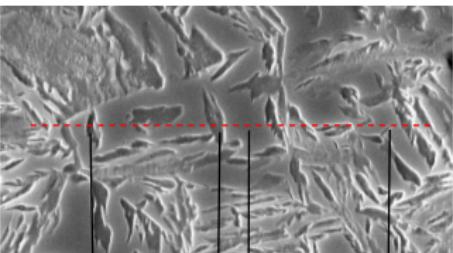
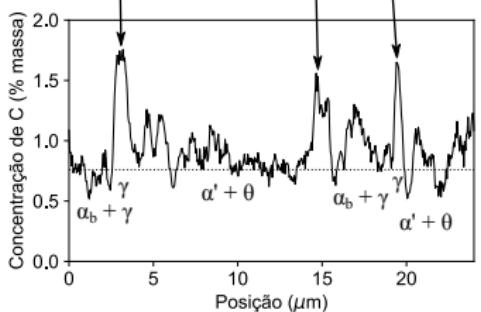
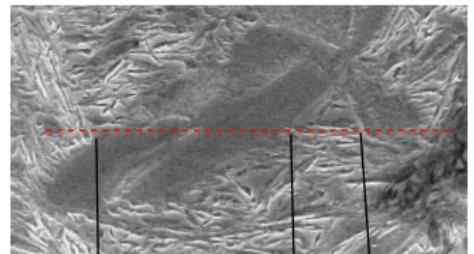
31



# Microestruturas T&P

Efeito do tempo de partição ( $t_P$ )

$T_T = 170^\circ\text{C}$ ;  $T_P = 375^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$   
EPMA



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

32

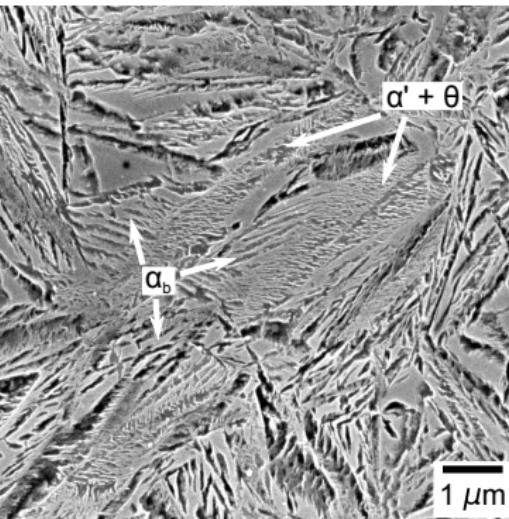
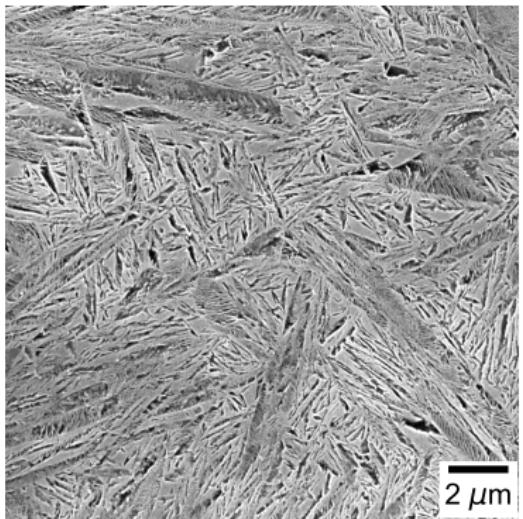


# Microestruturas T&P

Efeito da temperatura de partição ( $T_P$ )

$T_T = 170^\circ\text{C}$ ;  $T_P = 300^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$

- ▶ Carbonetos na martensita
- ▶  $\alpha_b$  mais refinada do que a  $375^\circ\text{C}$



33

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

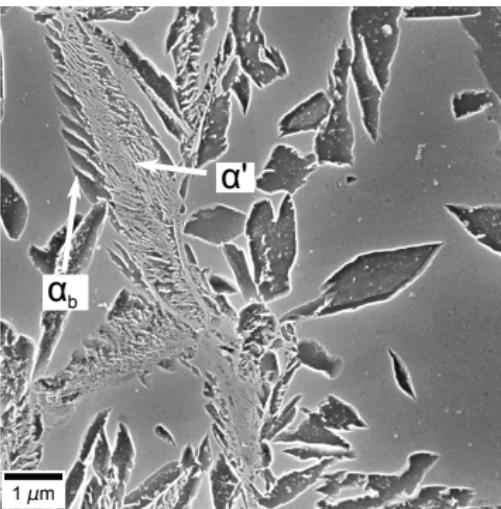
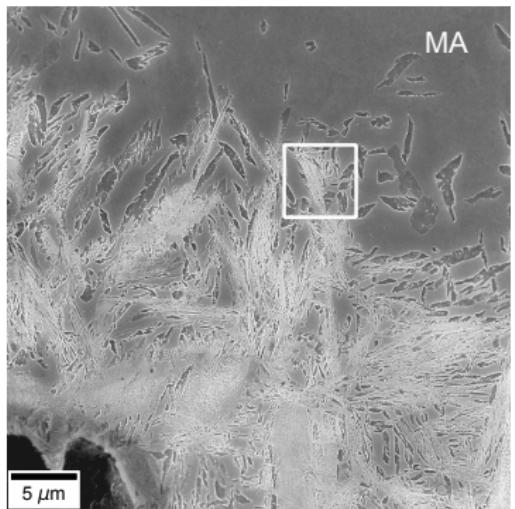


# Microestruturas T&P

Efeito da temperatura de partição ( $T_P$ )

$$T_T = 170 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_P = 450 \text{ }^{\circ}\text{C} / 30 \text{ s}$$

- ▶ Carbonetos na martensita
- ▶  $\alpha_b$  mais grossa do que a  $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ▶ Nucleação de  $\alpha_b$  nos contornos  $\alpha' + \theta/\gamma$



34

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

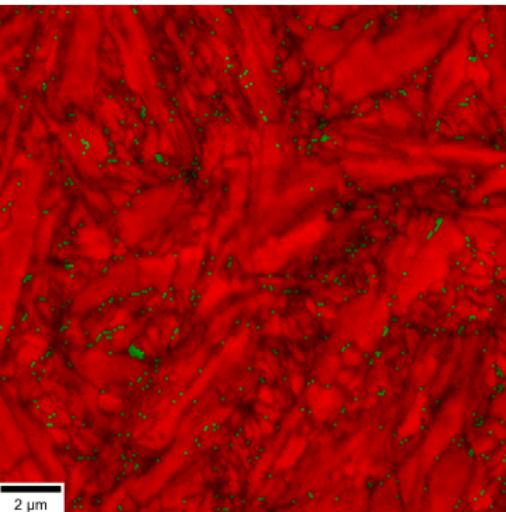
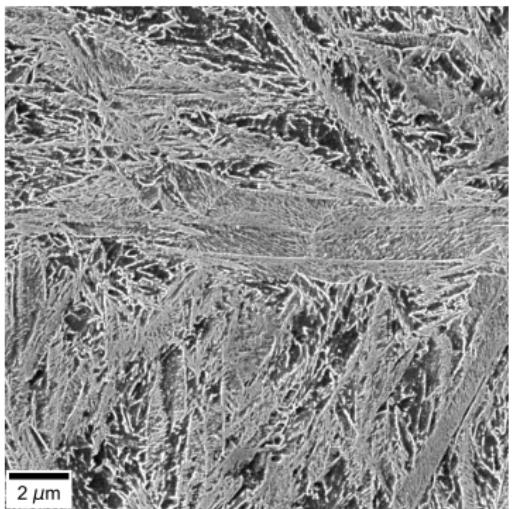


# Microestruturas T&P

## Efeito da temperatura de partição ( $T_P$ )

$T_T = 170^\circ\text{C}$ ;  $T_P = 450^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$

- ▶ Toda austenita é consumida após 15 min de partição



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

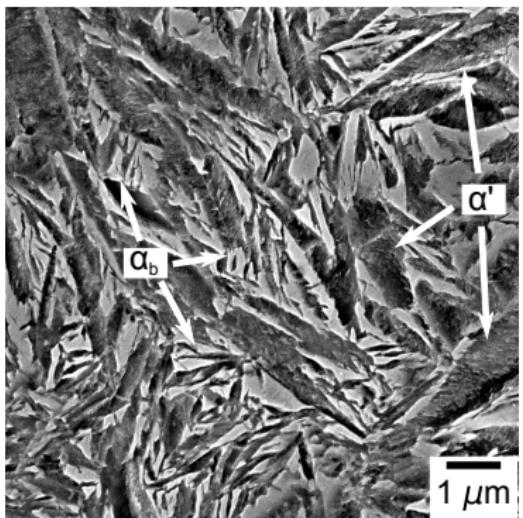
35



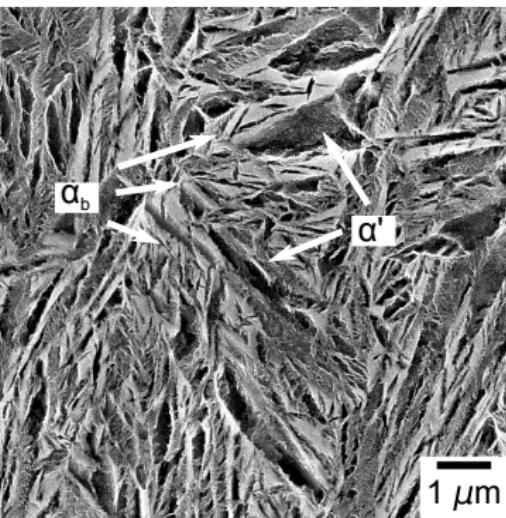
# Microestruturas T&P

Efeito da temperatura de têmpera ( $T_T$ )

- $T_T = 140, 170$  e  $200^\circ\text{C}$ ;  $T_P = 300^\circ\text{C}$
- Bainita é mais refinada quando menor  $T_T$  (menores grãos não transformados de austenita)



$T_T = 140^\circ\text{C}$



$T_T = 170^\circ\text{C}$

36

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

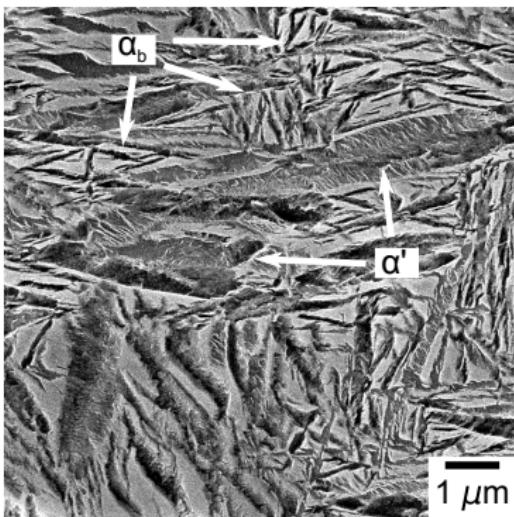
Conclusões



# Microestruturas T&P

Efeito da temperatura de têmpera ( $T_T$ )

- $T_T = 140, 170$  e  $200^\circ\text{C}$ ;  $T_P = 300^\circ\text{C}$
- Bainita é mais refinada quando menor  $T_T$  (menores grãos não transformados de austenita)



$T_T = 200^\circ\text{C}$

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

36

72



# Microestruturas T&P

Efeito da temperatura de têmpera ( $T_T$ )

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

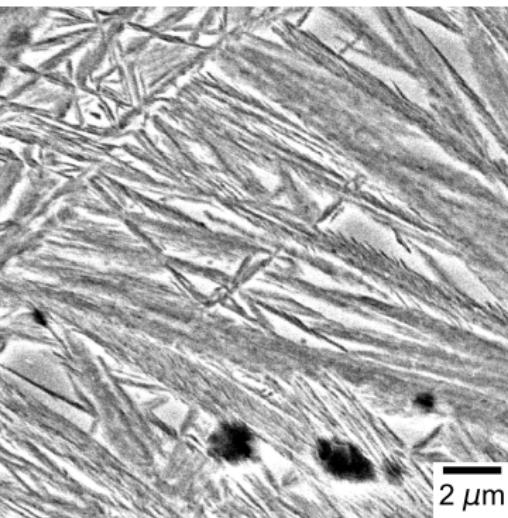
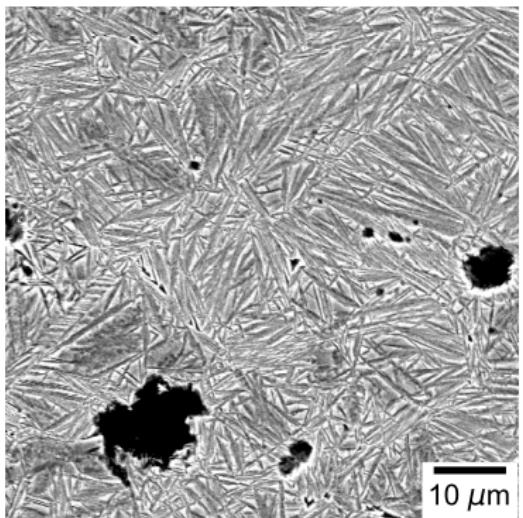
Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

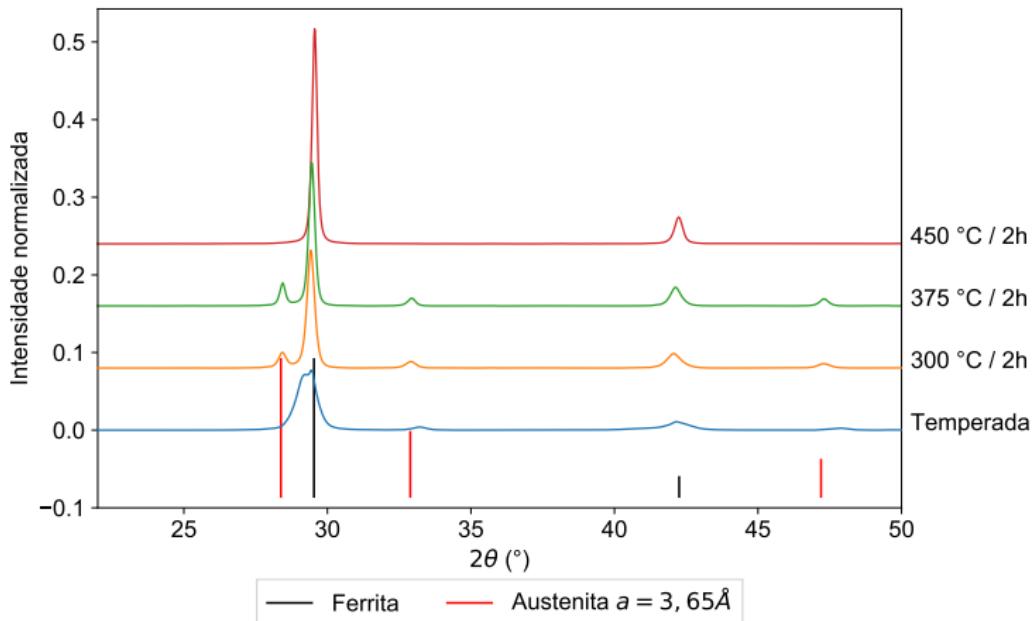
37



- Efeito de refinamento da bainita mais claro pela observação da amostra austemperada a 300 °C



- DRX síncrotron usando detector 2D
- $T_T = 170^\circ\text{C}$



38

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares  
Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

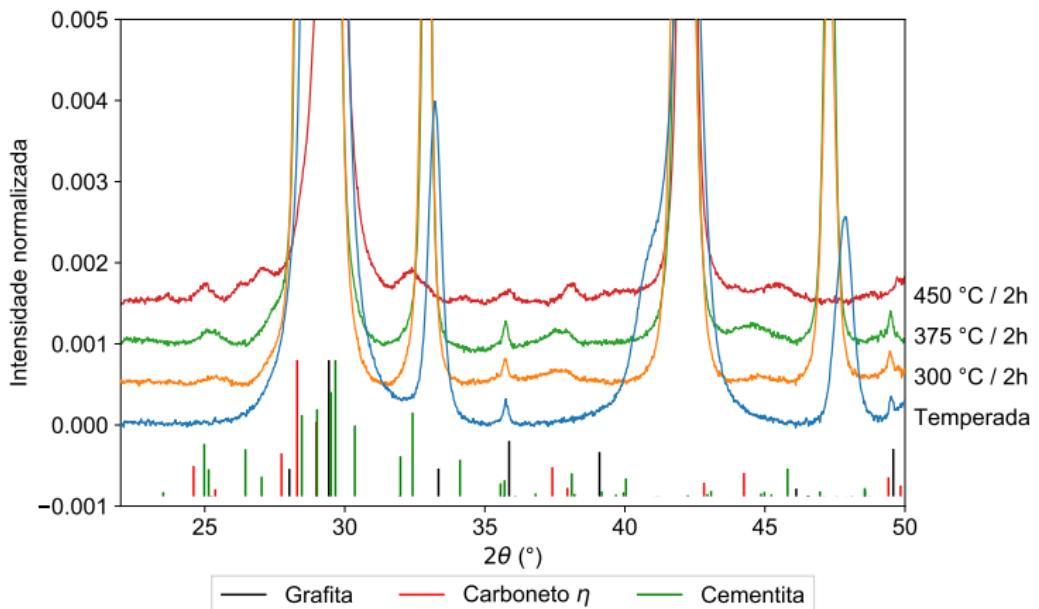
72

# Microestruturas T&P

## Carbonetos



- DRX síncrotron usando detector 2D
- $T_T = 170^\circ\text{C}$



38

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

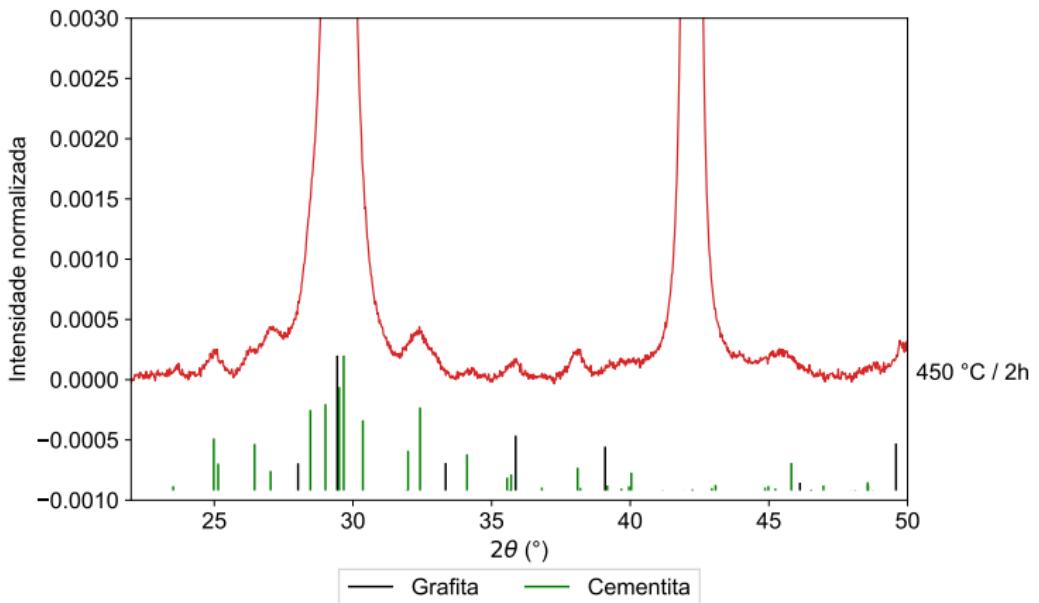
Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

72



39

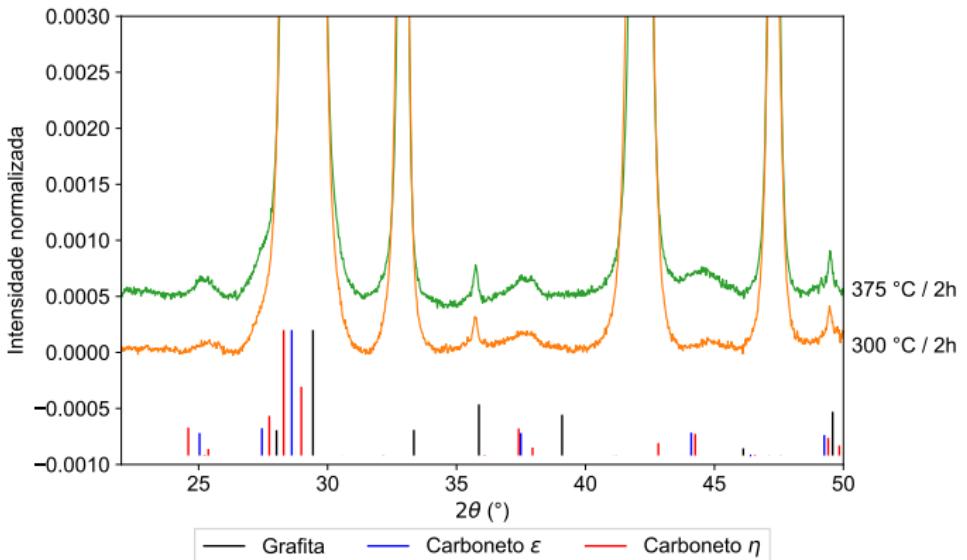


72



40

### ► Carbonetos $\epsilon$ ou $\eta$ a 300 e 375 °C



72



# Sumário

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares  
Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Introdução e objetivos

Material e métodos

Material e métodos

## Resultados e discussão

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

**Cinética das transformações de fases durante T&P**

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

**Cinética das transformações de fases durante T&P**

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

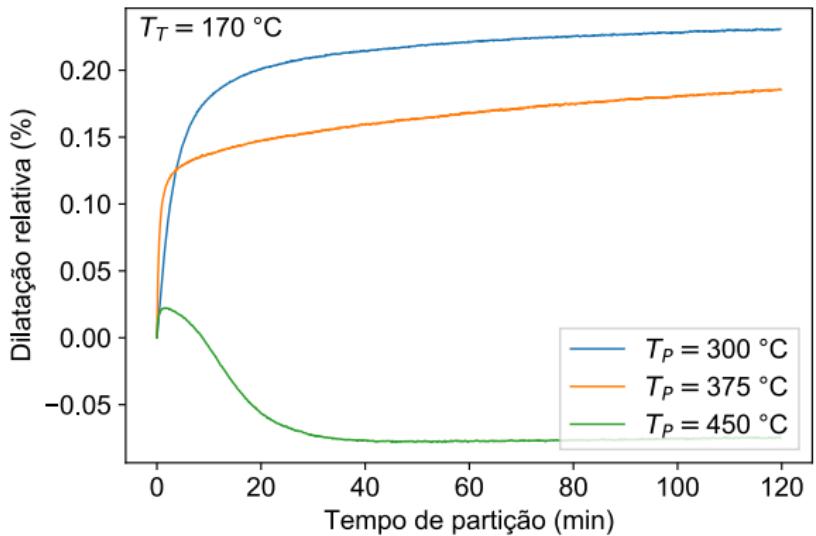
Conclusões

41

72



- ▶  $T_T = 170^\circ\text{C}$
- ▶ Dilatação durante a etapa de partição: expansão em todas as condições
- ▶ Contração a  $450^\circ\text{C}$ : cementita



42

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

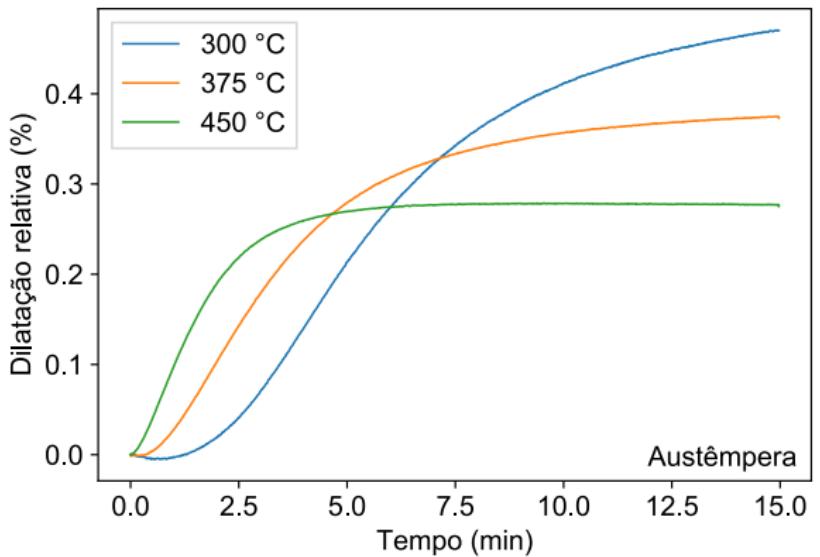
Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

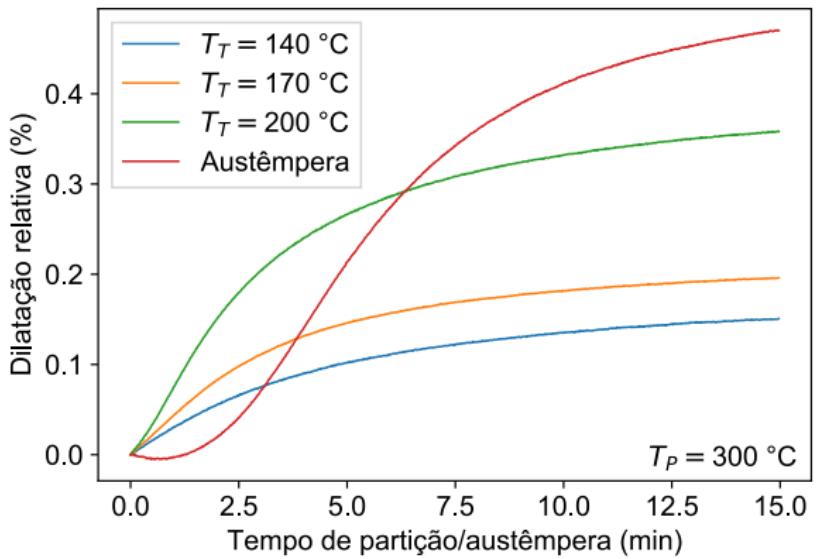
Conclusões

72





43



72



Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e  
discussão

Características  
microestruturais pré etapa  
de partição

Caracterização  
microestrutural das  
amostras T&P

44  
Cinética das  
transformações de fases  
durante T&P

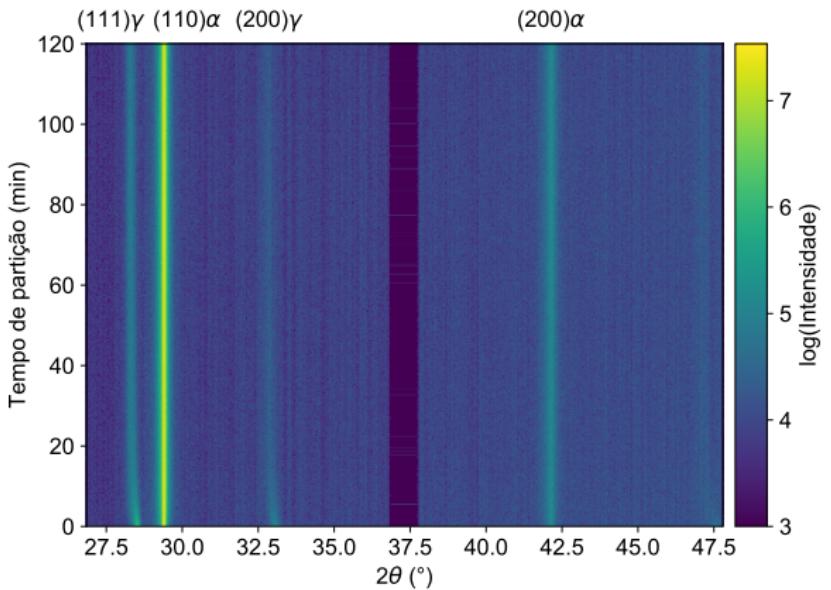
Modelo computacional de  
redistribuição de carbono

Conclusões

- ▶ Presença da martensita afeta a cinética da reação bainítica
- ▶ Como mostra micrografias, nucleação de  $\alpha_b$  ocorre nas interfaces  $\alpha'/\theta$



- ▶ Evolução do pico  $(111)\gamma$ : atenuação e deslocamento para maiores valores de distância interplanar → Reação bainítica consome  $\gamma$ ; carbono distorce  $\gamma$



45

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

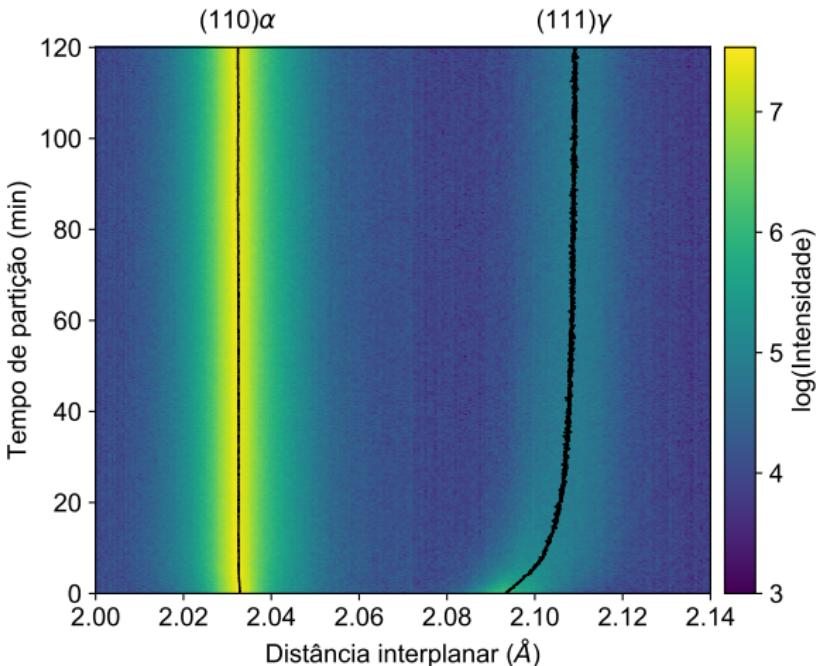
Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



- Evolução do pico  $(111)\gamma$ : atenuação e deslocamento para maiores valores de distância interplanar → Reação bainítica consome  $\gamma$ ; carbono distorce  $\gamma$



45

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

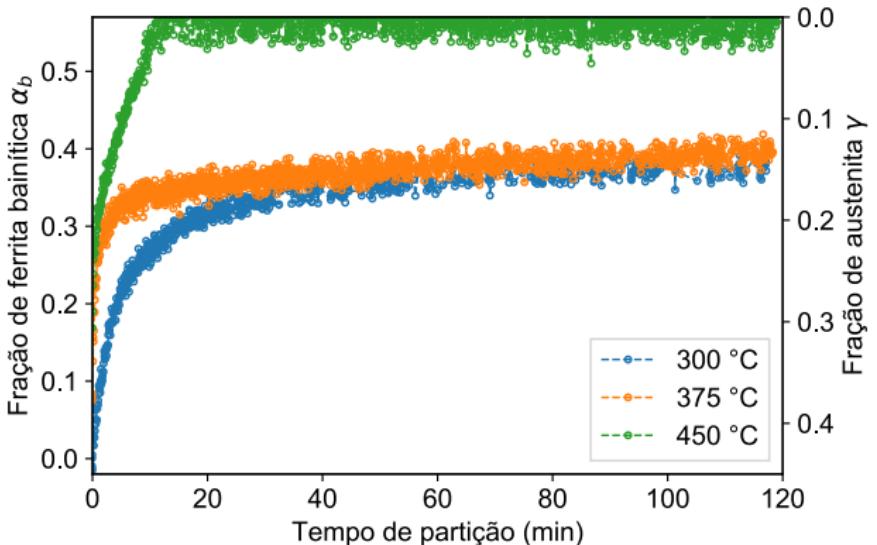
72

# Cinética

Difração de raios X *in situ*



- $T_T = 170^\circ\text{C}$
- Fração de ferrita bainítica  $f^{\alpha_b}$  calculada assumindo que  $f^{\alpha'}$  é constante
- A  $450^\circ\text{C}$  toda  $\gamma$  é consumida
- $f^{\alpha_b}$  para  $t_P = 0$  é maior do que zero  $\rightarrow \alpha_b$  no aquecimento



46

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

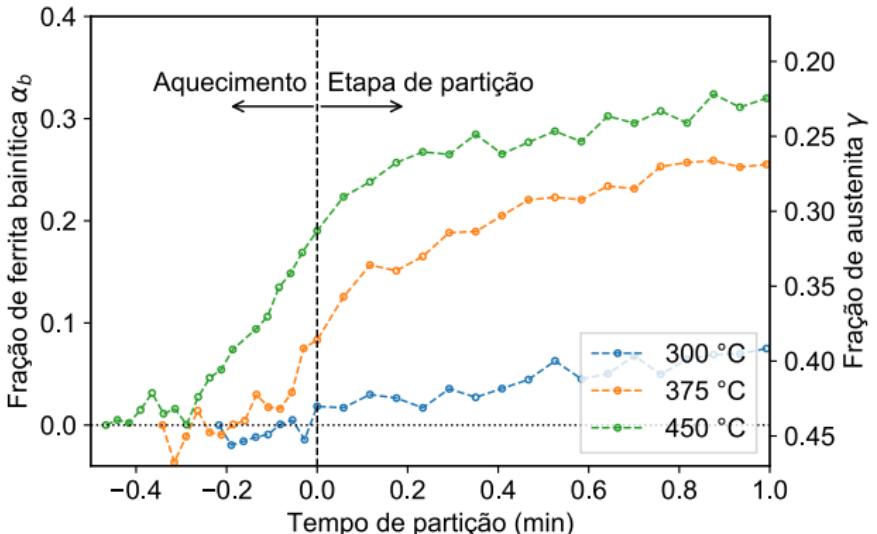
Conclusões



# Cinética

Difração de raios X *in situ*

- $T_T = 170^\circ\text{C}$
- Fração de ferrita bainítica  $f^{\alpha_b}$  calculada assumindo que  $f^{\alpha'}$  é constante
- A  $450^\circ\text{C}$  toda  $\gamma$  é consumida
- $f^{\alpha_b}$  para  $t_P = 0$  é maior do que zero  $\rightarrow \alpha_b$  no aquecimento



46

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

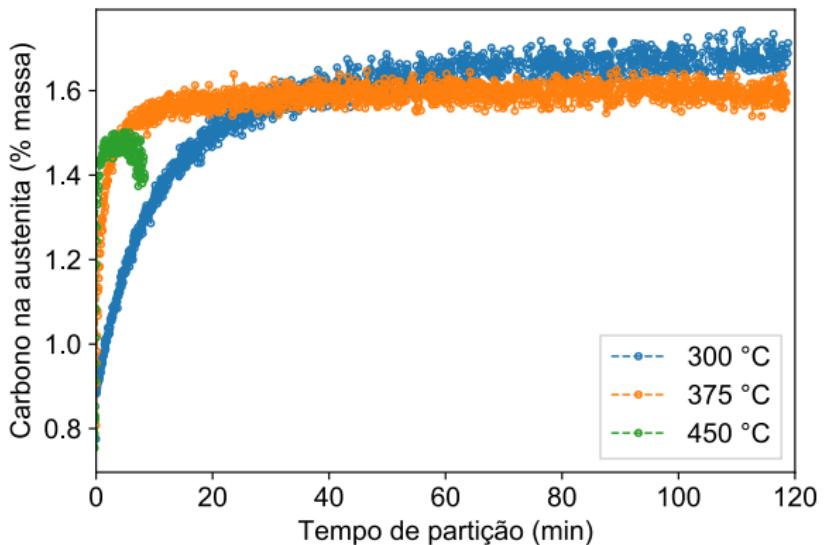
72

# Cinética

Difração de raios X *in situ*



- ▶ Em todas condições  $\gamma$  enriquece em carbono
- ▶ Tendências parecem com as curvas de  $f^{\alpha_b}$
- ▶ Sugere que enriquecimento em C de  $\gamma$  é controlado por formação de  $\alpha_b$



47

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

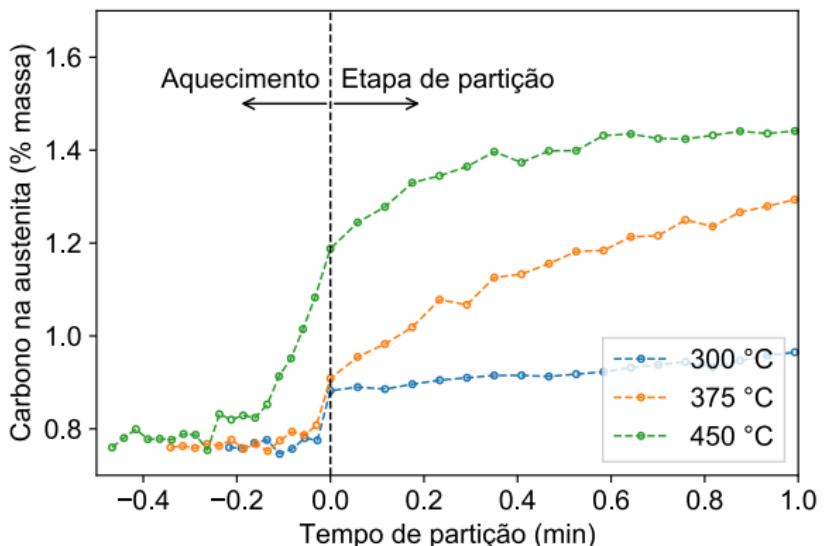
Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

72



- ▶ Em todas condições  $\gamma$  enriquece em carbono
- ▶ Tendências parecem com as curvas de  $f^{\alpha_b}$
- ▶ Sugere que enriquecimento em C de  $\gamma$  é controlado por formação de  $\alpha_b$



47

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

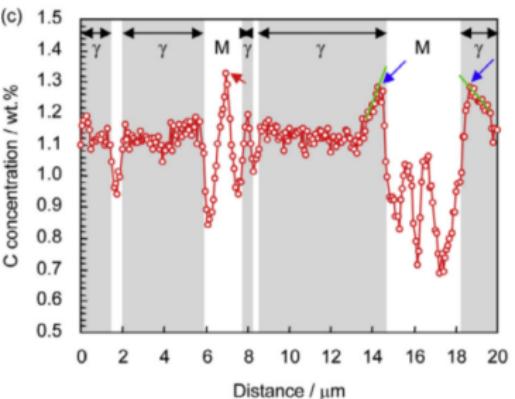
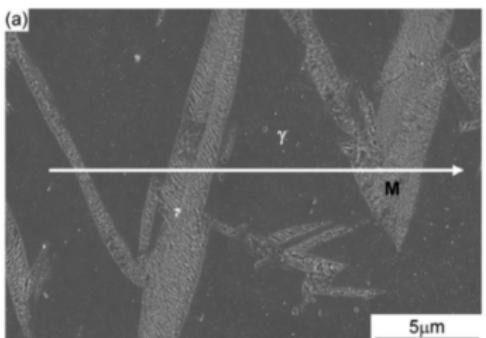
Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

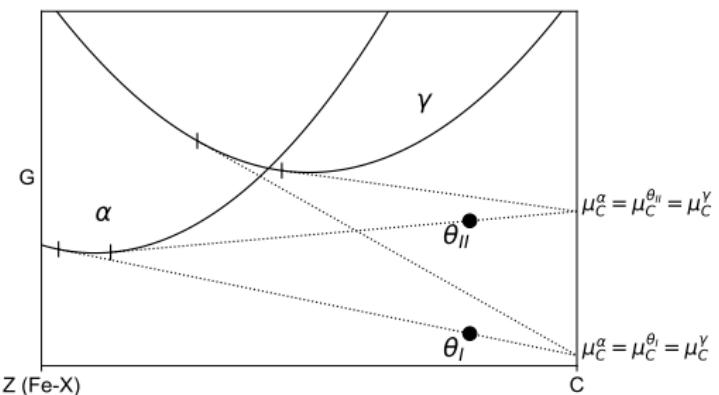
72



<sup>1</sup> Toji, Y., Miyamoto, G. & Raabe, D. Carbon partitioning during quenching and partitioning heat treatment accompanied by carbide precipitation. Acta Mater. 86, 137–147 (2015).



- ▶ Limite termodinâmico da partição de carbono
- ▶ Toji, Miyamoto e Raabe (2015)<sup>1</sup> observaram experimentalmente a partição de carbono entre  $(\alpha' + \theta)$  e  $\gamma$  mesmo na presença de  $\theta$  precipitado em  $\alpha'$
- ▶ Partição de carbono é possível se  $\mu_C^{\alpha'+\theta} > \mu_C^\gamma$
- ▶ Modelo ECC $\theta$  (CCE $\theta$ ) de Toji: carbono em  $\gamma$  ( $w_C^\gamma$ ) após partição na presença de  $\theta$
- ▶  $w_C^\gamma$  depende da energia livre de  $\theta$ , mas não de  $f^{\alpha'}$



<sup>1</sup> Toji, Y., Miyamoto, G. & Raabe, D. Carbon partitioning during quenching and partitioning heat treatment accompanied by carbide precipitation. Acta Mater. 86, 137–147 (2015).

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

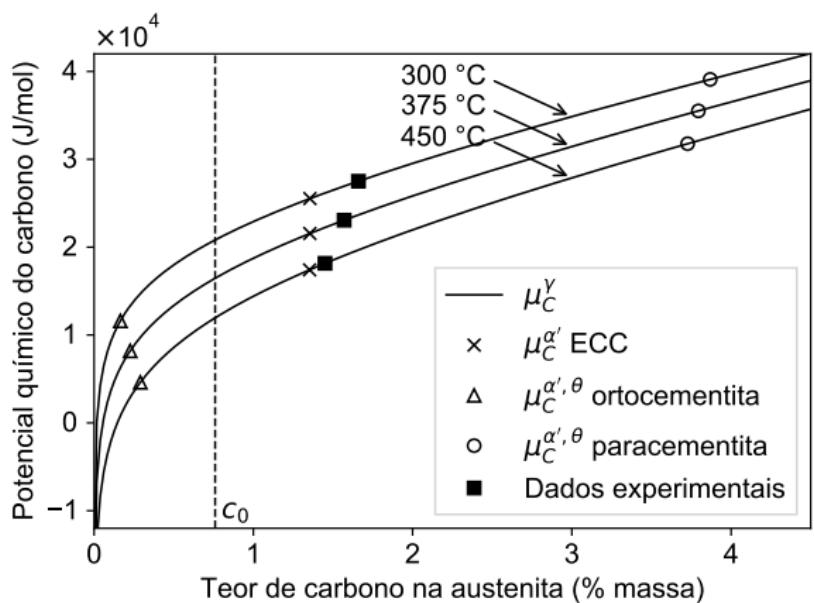
48  
Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



- ▶ ECCθ na liga estudada para diferentes carbonetos
- ▶ Extremos: ortocementita (mais estável, partição de elementos substitucionais) e paracementita (cementita de paraequilíbrio)



49

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares  
Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

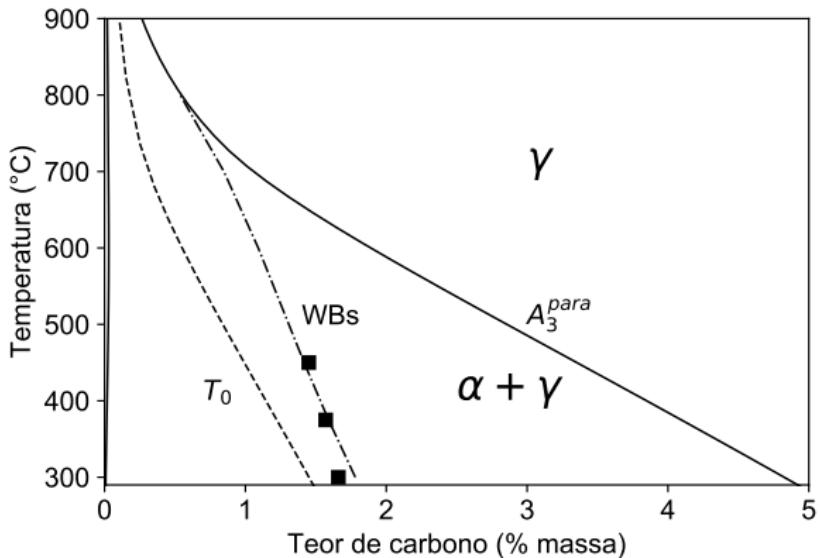
Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



- Limite termodinâmico da reação bainítica
- Pela teoria difusional: paraequilíbrio; pela teoria sem difusão:  $T_0$  ou  $T'_0$
- Paraequilíbrio não descreve bem resultados experimentais
- Modelo WBs Hillert<sup>1</sup>: força motriz adicional calculada a partir de dados empíricos



<sup>1</sup> Hillert, M., Höglund, L. & Ågren, J. Escape of carbon from ferrite plates in austenite. Acta Metall. Mater. 41, 1951–1957 (1993).

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares  
Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos  
Material e métodos

Resultados e discussão  
Características microestruturais pré etapa de partição  
Caracterização microestrutural das amostras T&P  
Cinética das transformações de fases durante T&P  
Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

50

72



# Resumo dos resultados experimentais

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

51

- ▶ Segregação causa distribuição heterogênea de  $\alpha'$ : regiões próximas de contornos de célula apresentam menos  $\alpha'$
- ▶ Carbonetos precipitam em  $\alpha'$  durante o aquecimento de  $T_T$  a  $T_P$
- ▶ Partição de carbono entre  $\alpha + \theta$  e  $\gamma$  acontece para curtos tempos
- ▶ Carbonetos não são completamente dissolvidos durante partição
- ▶ Reação bainítica acontece durante a etapa de partição
- ▶ Curvas de  $f_{\alpha_b}^{\alpha_b}$  e  $w_C^\gamma$  e modelo WBs sugerem que enriquecimento em C de  $\gamma$  é controlado por formação de  $\alpha_b$



# Sumário

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Introdução e objetivos

Material e métodos

Material e métodos

## Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Resultados e discussão

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Características microestruturais pré etapa de partição

Cinética das transformações de fases durante T&P

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Cinética das transformações de fases durante T&P

52

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

Conclusões

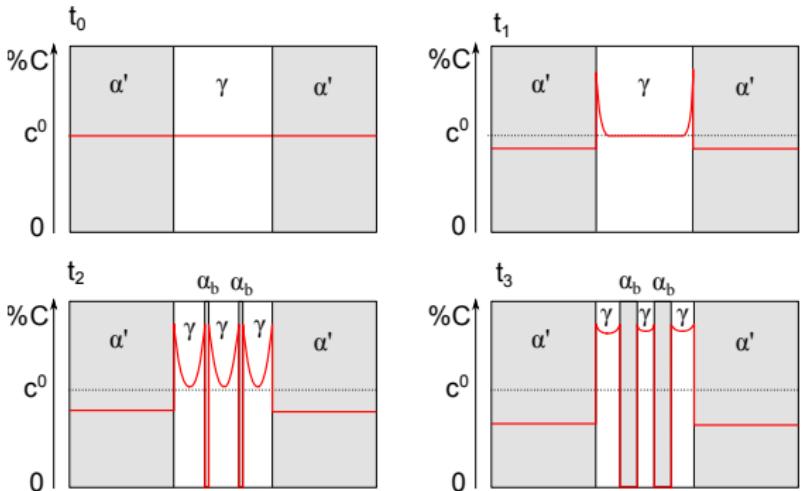
72

Dept. de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais -  
EPUSP



# Modelo redistribuição de C

Hipótese: poderia o *soft impingement* (interação dos perfis de difusão) desacelerar a partição de carbono entre  $\alpha'$  ( $\alpha' + \theta$ ) e  $\gamma$ ?



Simulações computacionais: crescimento  $\alpha_b$  e partição de carbono entre  $\alpha' + \theta$  e  $\gamma$

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

53  
Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

# Modelo redistribuição de C

## Metodologia



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

54

- ▶ Apenas partição de carbono (paraequilíbrio)
- ▶ Igualdade dos potenciais químicos de C na interface
- ▶ Fluxos de carbono são balanceados pelo problema de Stefan:

$$-\left.D_C^\alpha \frac{dc^\alpha}{dz}\right|_{int} + v(c_{int}^\gamma - c_{int}^\alpha) = -\left.D_C^\gamma \frac{dc^\gamma}{dz}\right|_{int}$$

- ▶ Interfaces  $(\alpha' + \theta)/\gamma$  são fixas ( $v = 0$ )
- ▶ Interfaces  $\alpha_b/\gamma$  são móveis. Velocidade é contabilizada pelo modelo de modo misto ( $v = \frac{M}{V_m} \Delta G_{quim}$ )
- ▶ Dados termodinâmicos (potenciais químicos) obtidos usando Thermo-Calc (TCFE8)
- ▶ Segunda lei de Fick resolvida numericamente utilizando o método de diferenças finitas

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

# Modelo redistribuição de C



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e  
discussão

Características  
microestruturais pré etapa  
de partição

Caracterização  
microestrutural das  
amostras T&P

Cinética das  
transformações de fases  
durante T&P

Modelo computacional de  
redistribuição de carbono

Conclusões

55

Resultados divididos em duas partes:

- ▶ Sem bainita + efeito da precipitação de carbonetos com diferentes energias livres
- ▶ Com bainita + efeito da precipitação de carbonetos com diferentes energias livres



# Partição de carbono $(\alpha' + \theta)/\gamma$

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

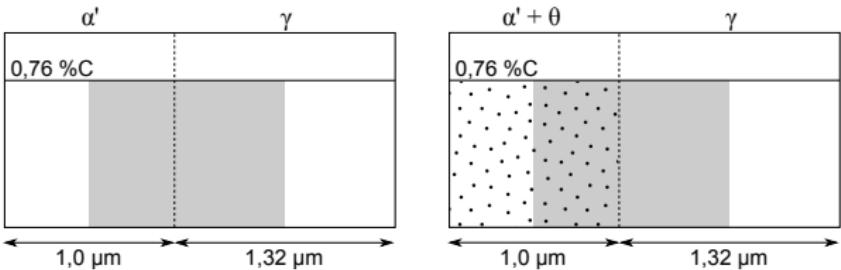
Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

56 Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

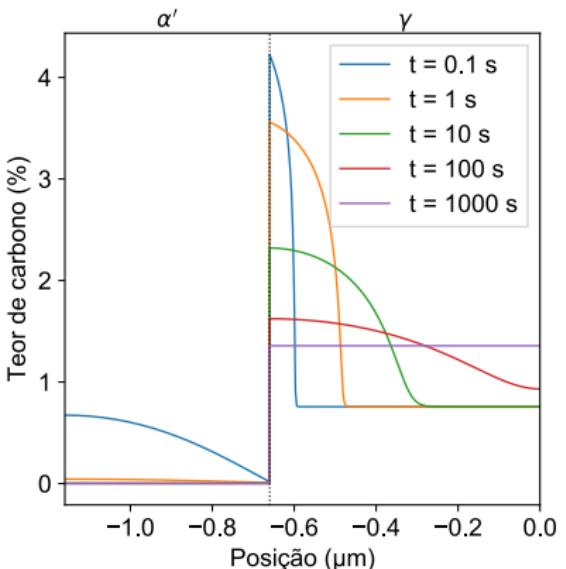




# Partição de carbono $\alpha'/\gamma$

## Sem carbonetos

- ▶ Caso mais simples de todos
- ▶ C em  $\gamma$  na interface cresce rapidamente (max.  $\approx 4,5\%$ )
- ▶ Partição muito rápida: todo C em  $\alpha'$  difunde para austenita em cerca de 1 s



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

57

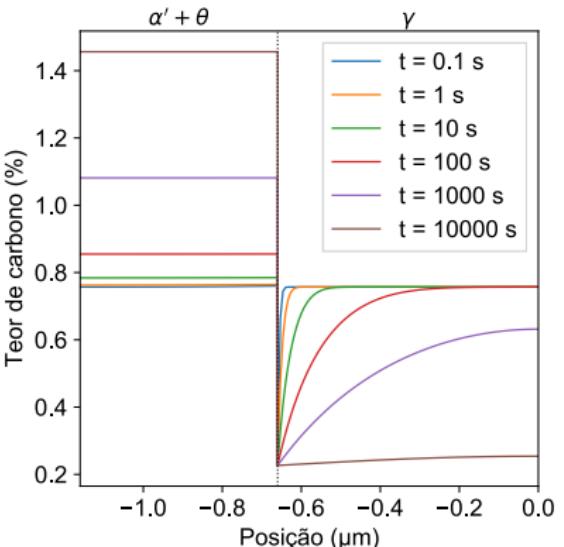
72



# Partição de carbono ( $\alpha' + \theta$ )/ $\gamma$

## $\theta$ : Ortocementita

- $\mu_C^{\alpha'+\theta} < \mu_C^\gamma \rightarrow$  Carbono interfacial em  $\gamma$  calculado pelo ECC $\theta$  é menor do que  $c_0$
- Difusão de carbono acontece de  $\gamma$  para  $\alpha' + \theta$
- Aumento de carbono em  $\alpha' + \theta \rightarrow$  aumento da fração de carbonetos



58

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&amp;P

Cinética das transformações de fases durante T&amp;P

Dept. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - EPUSP

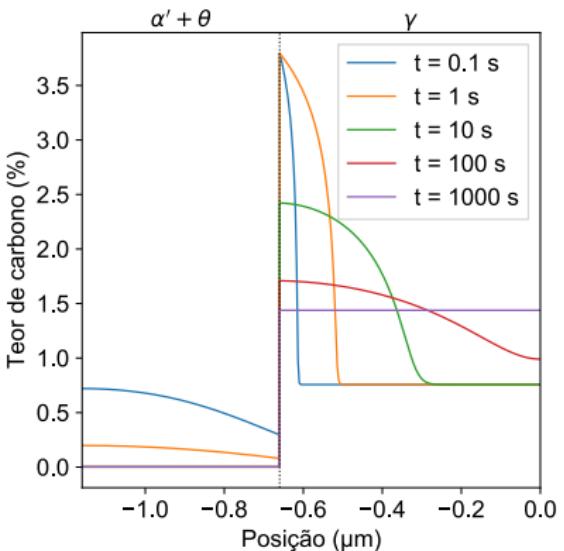
72



# Partição de carbono $(\alpha' + \theta)/\gamma$

## $\theta$ : Paracementita

- ▶ Paracementita: carboneto de alta energia livre (interação negativa Si-C aumenta atividade de C)
- ▶  $\mu_C^{\alpha'+\theta} > \mu_C^\gamma \rightarrow$  partição ocorre de  $\alpha' + \theta$  para  $\gamma$
- ▶ Diminuição de carbono em  $\alpha' + \theta \rightarrow$  diminuição da fração de carbonetos
- ▶ Partição é mais lenta do que no cenário sem carbonetos



59

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

72

Dept. de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais -  
EPUSPT&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

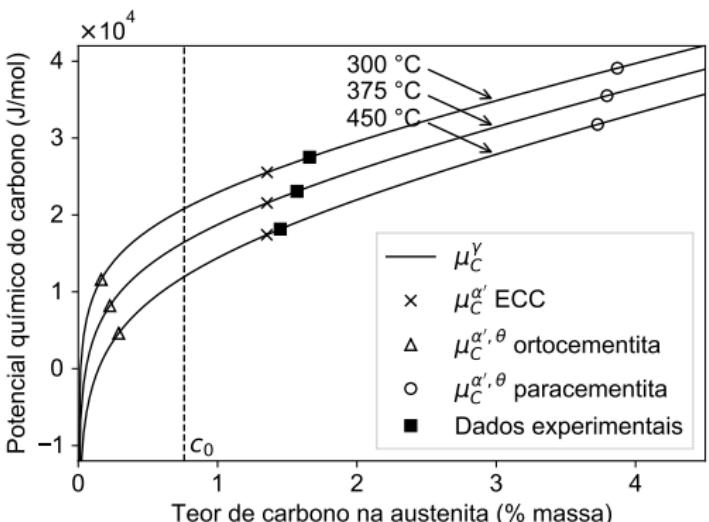
Caracterização microestrutural das amostras T&amp;P

Cinética das transformações de fases durante T&amp;P



# Partição de carbono ( $\alpha' + \theta$ )/ $\gamma$

- ▶ Nem ortocementita nem paracementita devem representar bem carbonetos de transição
- ▶ Dados termodinâmicos de carbonetos de transição não são encontrados na literatura
- ▶ Simulações feitas para carbonetos com energias livres variando de ortocementita para paracementita



60

Modelo computacional de redistribuição de carbono

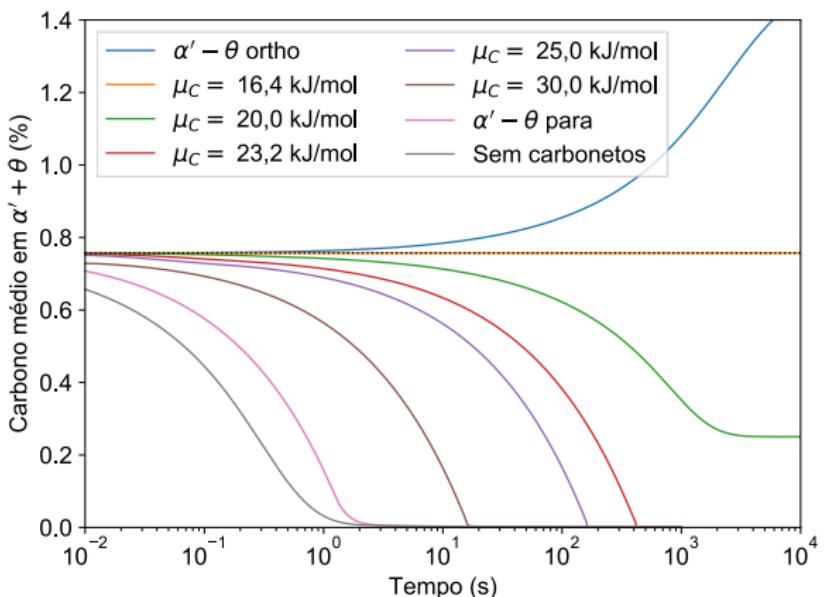
Conclusões

72



# Partição de carbono ( $\alpha' + \theta$ )/ $\gamma$

- Energias livres representadas pelo potencial químico  $\mu_C^{\alpha' + \theta}$
- Partição é mais lenta quando os carbonetos possuem menor energia livre (mais estáveis)
- $\theta$  mais estável  $\rightarrow$  menor carbono interfacial em  $\gamma \rightarrow$  difusão de C mais lenta



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

61

72



# Partição de carbono $(\alpha' + \theta)/\gamma$ + crescimento de $\alpha_b$

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

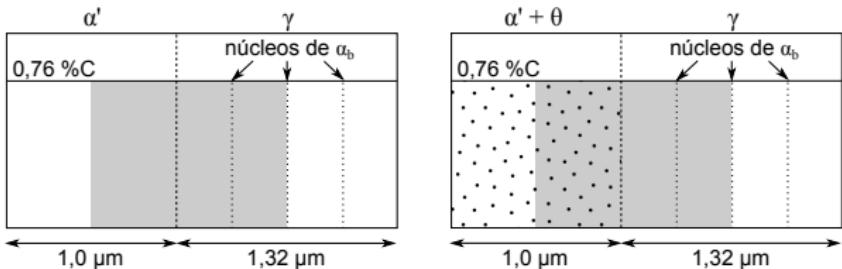
Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

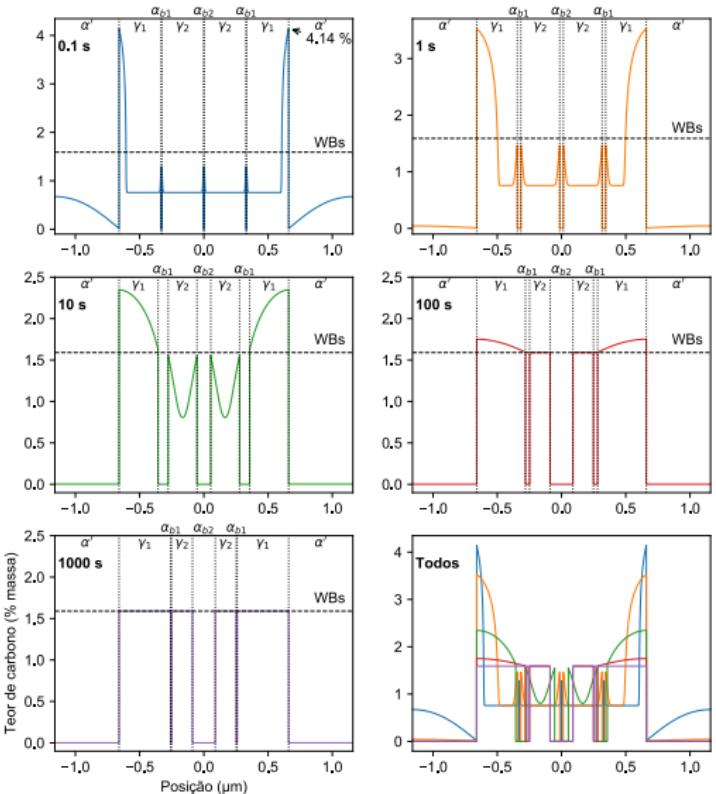
62





# Partição de carbono ( $\alpha' + \theta$ )/ $\gamma$ + crescimento de $\alpha_b$

## Sem carbonetos



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

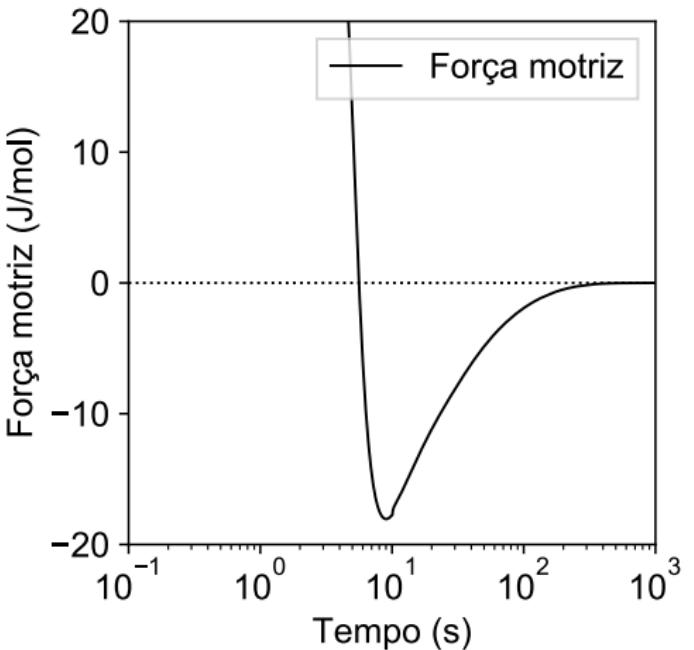
63

72



# Partição de carbono ( $\alpha' + \theta$ )/ $\gamma$ + crescimento de $\alpha_b$

- Força motriz para crescimento de  $\alpha_b$  descresce até eventualmente ficar negativa  $\rightarrow$  sentido de movimentação da interface é invertido



64

Modelo computacional de redistribuição de carbono

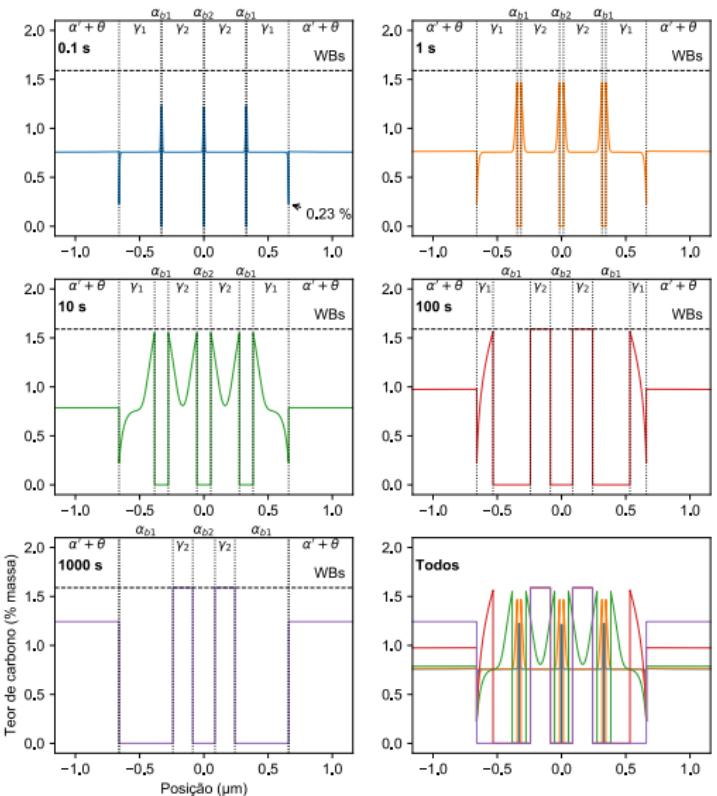
Conclusões

72



# Partição de carbono ( $\alpha' + \theta$ )/ $\gamma$ + crescimento de $\alpha_b$

## Ortocementita



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

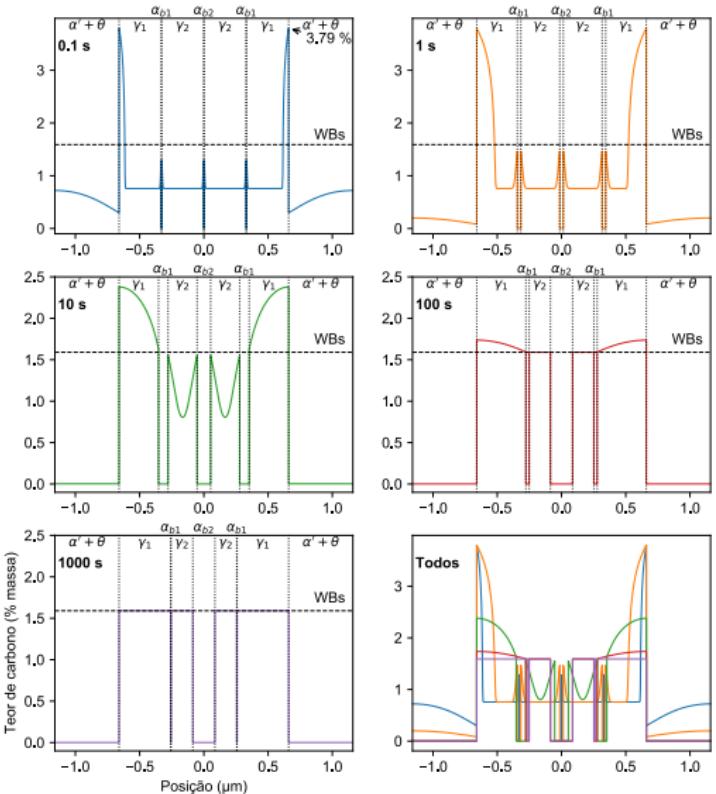
65 Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões



# Partição de carbono ( $\alpha' + \theta$ )/ $\gamma$ + crescimento de $\alpha_b$

## Paracementita



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

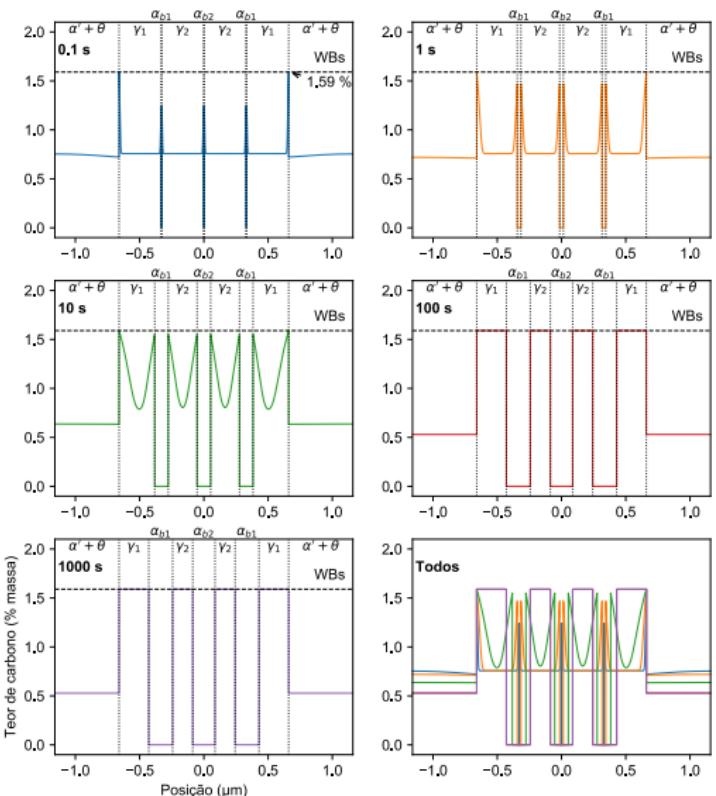
66

72



# Partição de C ( $\alpha' + \theta$ )/ $\gamma$ + crescimento de $\alpha_b$

$\mu_C = 23,2 \text{ kJ/mol} \rightarrow$  composição de  $\gamma$  na interface ( $\alpha' + \theta$ )/ $\gamma$  = WBs



T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

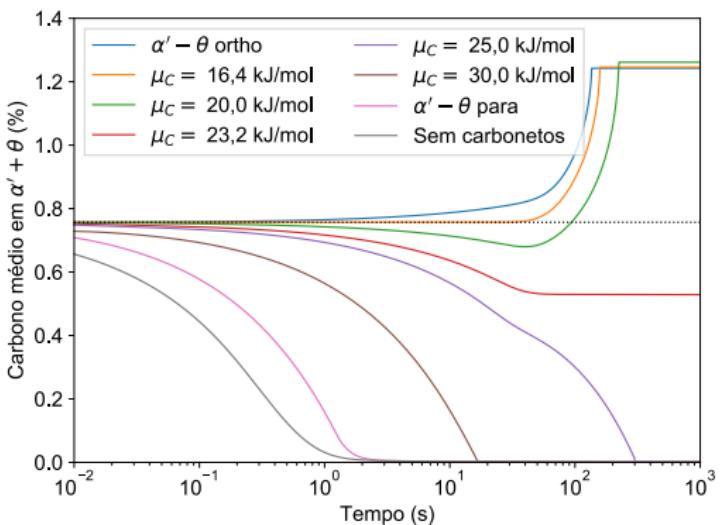
Conclusões

67

72



- ▶  $\mu_C = 23,2 \text{ kJ/mol} \rightarrow$  soft impingement faz que a partição de C entre  $\alpha' + \theta$  e  $\gamma$  cesse
- ▶  $\mu_C > 23,2 \text{ kJ/mol} \rightarrow$  partição de C ocorre de  $\alpha' + \theta$  para  $\gamma$  para curtos tempos. Para tempos suficientemente longos a direção é invertida
- ▶ Comparação quando não há bainita



68

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

72

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

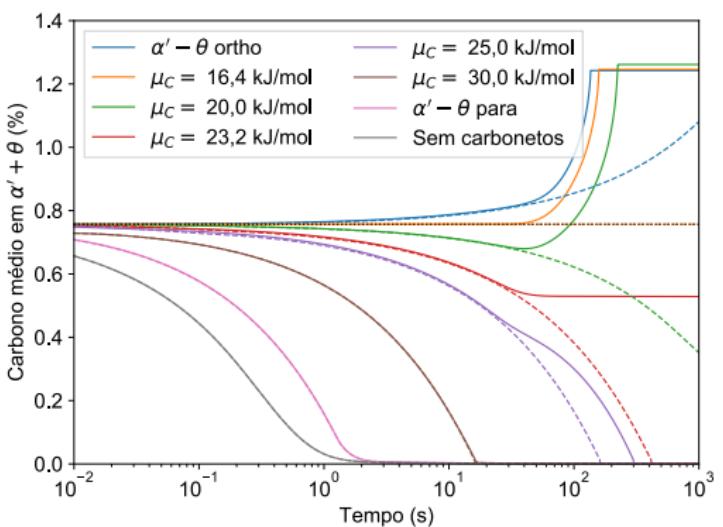
Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&amp;P

Cinética das transformações de fases durante T&amp;P



- ▶  $\mu_C = 23,2 \text{ kJ/mol} \rightarrow$  soft impingement faz que a partição de C entre  $\alpha' + \theta$  e  $\gamma$  cesse
- ▶  $\mu_C > 23,2 \text{ kJ/mol} \rightarrow$  partição de C ocorre de  $\alpha' + \theta$  para  $\gamma$  para curtos tempos. Para tempos suficientemente longos a direção é invertida
- ▶ Comparação quando não há bainita



68

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares  
Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&amp;P

Cinética das transformações de fases durante T&amp;P



## T&P de Ferros Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

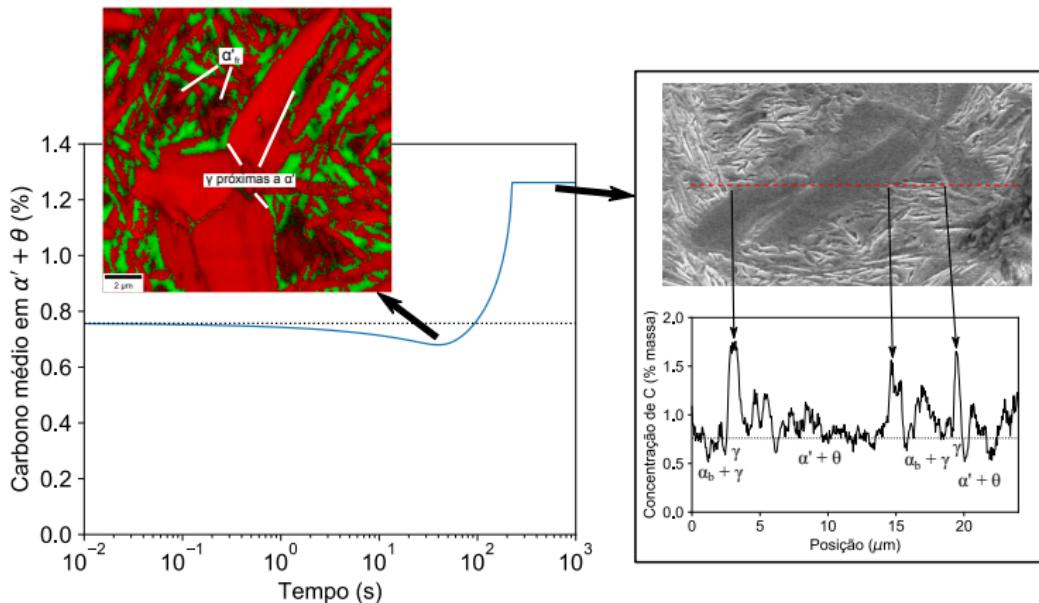
Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Conclusões

69



72



# Sumário

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

## Introdução e objetivos

Introdução e objetivos

## Material e métodos

Material e métodos

## Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

## 70 Conclusões

## Conclusões



# Conclusões

1. **Microssegregação** não foi completamente eliminada durante a austenitização e causa uma **distribuição heterogênea da martensita**. Contornos de célula apresentam mais martensita do que regiões próximas a nódulos de grafita.
2. Precipitação de **carbonetos na martensita** acontece durante o aquecimento desde a temperatura de têmpera até a temperatura de partição. Carbonetos de transição ( $\eta$  ou  $\epsilon$ ) são precipitados a 300 e a 375 °C. Cementita precipita a 450 °C.
3. A **reação bainítica** acontece durante a etapa de partição. Para  $T_p$  igual a 300 e 375 °C a reação ocorre sem precipitação de carbonetos (ferrita bainítica), promovendo enriquecimento da austenita em carbono. A 450 °C sob tempos curtos (< 5 min) a reação bainítica também promove o enriquecimento em carbono da austenita. Para tempos longos a precipitação de carbonetos acontece, consumindo toda a austenita.
4. A reação bainítica é acelerada na presença de martensita devido à nucleação de bainita nas interfaces  $\alpha'/\gamma$

T&P de Ferros  
Fundidos Nodulares

Arthur Nishikawa

Introdução e objetivos

Material e métodos

Resultados e discussão

Características microestruturais pré etapa de partição

Caracterização microestrutural das amostras T&P

Cinética das transformações de fases durante T&P

Modelo computacional de redistribuição de carbono

71 Conclusões



# Conclusões

5. A partição de carbono entre a  $\alpha' + \theta$  e  $\gamma$  é observada para tempos curtos de partição (30 s) a 375 °C.
6. O carbono rejeitado durante a reação bainítica faz com que a partição de carbono entre  $\alpha' + \theta$  e  $\gamma$  seja limitada aos primeiros instantes da etapa de partição. Assim, a formação de **ferrita bainítica é o principal mecanismo de enriquecimento em carbono da austenita**.
7. A diminuição da **temperatura de partição** tem o efeito de refinar o produto bainítico. A diminuição da **temperatura de têmpera** refina a microestrutura do produto bainítico pela repartição dos grãos de austenita pela maior fração de placas de martensita.
8. A microestrutura final produzida pelo tratamento T&P aplicado ao ferro fundido consiste de martensita revenida com carbonetos, ferrita bainítica e austenita enriquecida estabilizada pelo carbono.

Obrigado pela atenção!

