

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE PREVISIBILIDADE DE CINÉTICA DE TRANSFORMAÇÃO DE FASES APLICADOS À TRANSFORMAÇÃO AUSTENITA-PERLITA SOB RESFRIAMENTO CONTÍNUO*

Karine Fernandes Rodrigues¹
Geraldo Lúcio de Faria²

Resumo

Com a crescente demanda pelo transporte ferroviário, as ferrovias têm sido submetidas a condições cada vez mais severas de solicitação mecânica. Com isso, a exigência por trilhos fabricados a partir de aços que apresentem bom desempenho mecânico, assim como a aplicação de técnicas de soldagem aprimoradas que requerem menos manutenção, tem sido cada vez maior. Dessa forma, tem se discutido cada vez mais sobre a importância do conhecimento da cinética de transformação de fases em aços eutetóides aplicados em ferrovias, visando o aprimoramento de processos de fabricação e de soldagem. Neste contexto, tendo em vista que ainda existem poucos trabalhos na literatura que exploram a cinética de transformação de fases em aços perlíticos aplicados à indústria ferroviária, assim como estudos que exploram modelos matemáticos de previsibilidade que possam ser empregados na melhoria do processamento destes aços, no presente trabalho, por meio da técnica de dilatométrica, foram analisadas as transformações de decomposição contínua da austenita em três aços eutetóides. Foram gerados os diagramas de Transformação de Fases em Resfriamento Contínuo (TRC) para cada aço estudado. Mostrou-se ainda que a partir de modelos matemáticos disponíveis na literatura é possível se ter previsibilidade da cinética de transformação de fases em resfriamento contínuo para os três aços estudados.

Palavras-chave: Aço Perlítico; Cinética de Transformação de Fases; Modelos Cinéticos; Diagrama TRC.

EVALUATION OF PREVISIBILITY MODELS OF PHASE TRANSFORMATION KINETICS APPLIED TO AUSTENITE-PEARLITE TRANSFORMATION UNDER CONTINUOUS COOLING

Abstract

With the increasing demand for rail transportation, railways have been subjected to increasingly severe conditions of mechanical solicitation. Thereat the requirement for rails made from steels with good mechanical performance has been increasing, as well as the application of improved welding techniques that require less maintenance. Thus, it has been increasingly discussed the importance of the knowledge about kinetics of phase transformation in eutectoid steels applied in railways, aiming at the improvement of manufacturing and welding processes. In this context, since there are not many studies considering kinetics of phase transformation in pearlitic steels applied to the railway industry, as well as studies exploring mathematical models of predictability that can be used to improve the processing of these steels, in this work, through the dilatometry technique, the austenite transformations under continuous cooling in the three eutectoid steels were analyzed. The Continuous Cooling Transformation (TRC) diagrams has been determined for each studied steel. The study also showed that applying mathematical models available in technical literature it is possible to predict the kinetics of phase transformation when the three studied steels are submitted to continuous cooling.

Keywords: Pearlitic Steel; Phase Transformation Kinetics; Kinetic Models; CCT Diagram.

¹ *Engenheira Metalúrgica, Mestranda na Rede Temática em Engenharia de Materiais/REDEMAT-UFOP, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

² *Físico, Dr., Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços perlíticos são amplamente utilizados na indústria ferroviária por possuírem boa resistência mecânica e ao desgaste, assim como tenacidade satisfatória. As propriedades mecânicas dos aços perlíticos são controladas pelas microestruturas desenvolvidas em seu processamento termomecânico, especialmente por características como tamanho de grão austenítico prévio, espaçamento interlamelar perlítico e tamanho das colônias de perlita [1,2].

Segundo a norma AREMA (2013) [3], os aços para trilhos, que apresentam uma microestrutura majoritariamente perlítica, podem ser classificados em duas classes, os *standard* e os *premium*. Os parâmetros adotados como critério de classificação são a composição química e as propriedades mecânicas finais do trilho, basicamente de dureza, limite de escoamento e de resistência.

Alguns fabricantes de trilhos ferroviários buscam rotas alternativas durante o processo de fabricação para se atingir a classe *premium* sem adição significativa de elementos de liga, mas submetendo os trilhos a um resfriamento controlado, após a etapa de laminação, de forma a obter uma microestrutura perlítica mais refinada, sem formação de martensita [4]. Dessa forma, o conhecimento da cinética de transformação de fases nesses aços é de grande importância quando se deseja avaliar o desenvolvimento da microestrutura do material em função do seu histórico de processamento, assim como entender a relação entre sua microestrutura e suas propriedades mecânicas. Além disso, modelar a cinética de transformação de fases sob resfriamento contínuo é essencial para se ter previsibilidade das temperaturas críticas e da velocidade de transformação, possibilitando assim uma melhor adequação dos processos empregados nesses aços.

Pensando nisso, vários modelos vêm sendo testados buscando alcançar essa previsibilidade das transformações de fases sob resfriamento contínuo em diversos tipos de aços [5-8]. Processos incluindo nucleação e crescimento sob condições isotérmicas, podem ser modelados usando o modelo clássico Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK). Esse modelo é uma forma simplificada, baseada em apenas dois parâmetros (K e n), de se caracterizar a cinética de transformação de fases. As constantes K e n podem ser relacionadas com os mecanismos de transformação apenas para casos específicos, para os quais as condições de contorno do problema permitam que a equação seja deduzida matematicamente. Entretanto, mesmo que para muitos sistemas as suposições básicas de condições de contorno não sejam atendidas a equação é muito utilizada de forma empírica, puramente matemática, devido à sua simplicidade e aplicabilidade a resultados experimentais. Prova disso, é o fato de diversos autores utilizarem a equação JMAK, de forma satisfatória, para descrever a cinética de transformação de fases em resfriamento contínuo para vários tipos de materiais.

Nesse sentido, Cezário (2018) [5] propôs um modelo, denominado Ferrita-tempo, para o estudo da cinética de transformação de fases em resfriamento contínuo para aços IF, desenvolvido a partir de uma adaptação empírica da equação proposta por Koistinen e Marburger (1959) [9] originalmente deduzida para transformação martensítica. Além disso, foi proposto pela autora um segundo modelo, denominado por ela como Modelo Empírico. De acordo com Cezário (2018), esse modelo possibilita prever as temperaturas críticas de transformação de fases para um determinado intervalo de taxas de resfriamento proposto.

Nesse contexto, visando o aprimoramento nos processos de fabricação e manutenção dos aços utilizados na indústria ferroviária, no presente trabalho, a

partir de dados gerados pela técnica de dilatométrica, foi realizada a caracterização da cinética de transformação de fases em resfriamento contínuo de três aços de aplicação ferroviária, sendo dois *premium* (A e B) e um *standard* (C). Foram utilizados três diferentes modelos matemáticos para a simulação da cinética da transformação de fases dos aços eutetóides analisados nesse trabalho, sendo possível avaliar a efetividade de cada um.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

No presente trabalho foram avaliados três diferentes tipos de aços aplicados na fabricação de trilhos ferroviários. Os aços foram identificados como A, B e C. Os trilhos A e B são classificados como do tipo *premium*, e o trilho C é classificado como *standard* [3]. As composições químicas dos aços analisados são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos aços estudados (%em massa)

Elemento	C	Si	S	Mn	P	Cr
A	0,792	0,304	0,0043	0,883	0,017	0,209
B	0,763	0,223	0,0098	1,017	0,016	0,211
C	0,731	0,539	0,0047	1,24	0,015	0,218

Elemento	Mo	Ni	Al	V	Nb	Ti
A	0,016	0,02270	0,00530	0,0016	0,0022	0,0005
B	0,000	0,01800	0,00300	0,0010	0,0000	0,0003
C	0,0166	0,02590	0,00630	0,0032	0,0170	0,0024

2.2 Procedimentos Experimentais

2.2.1 Ensaios de Dilatometria

Os corpos de prova de dilatométrica foram usinados a partir do centro dos boletos dos trilhos, na forma de cilindros maciços com 3mm de diâmetro e 10mm de comprimento. Os ensaios de dilatométrica foram realizados em um dilatômetro de têmpera da marca LINSEIS, modelo R.I.T.A. L78 do LTM do DEMET-EM-UFOP.

Para analisar o comportamento dos três aços quando submetidos ao resfriamento contínuo, os corpos de prova foram aquecidos a uma taxa constante de 3°C/s até a temperatura de 900°C e, na sequência, mantidos nesta temperatura por 60 segundos para completa austenitização. Em seguida foram submetidos a diferentes taxas de resfriamento (0,1°C/s, 0,5°C/s, 1°C/s, 2,5°C/s, 5°C/s, 10°C/s, 20°C/s, 50°C/s e 100°C/s). A partir das curvas de resfriamento, Comprimento Relativo em função da Temperatura, foram determinadas as temperaturas de início e final de decomposição da austenita (Ar_3 e Ar_1), pelo método do desvio mínimo [10].

Os tempos de início e final de decomposição da austenita foram determinados a partir da relação existente entre temperatura e tempo, dada pela Equação 1, onde T_γ é a temperatura de austenitização, que no presente trabalho é 900°C, taxa corresponde a taxa de resfriamento contínuo correspondente a cada ciclo térmico estudado e t é o tempo decorrido do início do resfriamento. Depois de determinadas as temperaturas e os tempos de início e final de decomposição da austenita para

cada taxa de resfriamento, foi possível, a partir de dados experimentais, gerar os diagramas TRC para os aços A, B e C.

$$t = \frac{T_y - T}{\text{taxa}} \quad (1)$$

2.2.2 Cinética de decomposição da austenita durante o resfriamento contínuo

Para o estudo da cinética de decomposição da austenita em perlita, foi realizada a determinação da fração de perlita formada em função do tempo, para cada um dos três aços estudados, por meio do método da regra da alavanca [11]. A partir da curva de Fração de Perlita Formada em função do Tempo, obtida para cada taxa de resfriamento, foi aplicado o modelo de JMAK adaptado para transformações sob resfriamento contínuo, dado pela Equação 2, onde x é a fração de fase formada, k é uma constante para uma dada temperatura, n é comumente conhecido como expoente de Avrami, e t é o tempo [12].

$$X = 1 - \exp(-Kt^n) \quad (2)$$

Para descrever a cinética de transformação de fases em resfriamento contínuo, o modelo proposto por Cezário (2018) [5] representado pela Equação 3, também foi utilizado. Nessa equação, y é a fração de austenita decomposta em função do tempo e K , n e T_f são constantes de ajustes. Esse modelo também foi aplicado às curvas de Fração de Perlita formada em função do Tempo.

$$y = \exp(-k(T_y + (-\text{taxa} * t) - T_f)^n) \quad (3)$$

Tanto o modelo JMAK quanto o modelo Ferrita-Tempo permitem que a fração da fase formada seja calculada como uma função do tempo, assim sendo, para se determinar as temperaturas Ar_3 e Ar_1 , é necessário que, para cada taxa de resfriamento ensaiada, Ar_3 seja determinada para uma fração de nova fase tendendo a 0 e Ar_1 para uma fração de nova fase tendendo a 1. Entretanto, essas metodologias seriam limitadas, pois só permitiriam a determinação das temperaturas críticas para as taxas de resfriamento realmente aplicadas nos experimentos. Sendo assim, o modelo denominado Modelo Empírico, também proposto por Cezário (2018) [5], dado pela Equação 4, foi utilizado nesse trabalho para o estudo da cinética de decomposição da austenita em resfriamento contínuo. Nessa equação y_0 , A e B são constantes de ajuste. Segundo a autora, por meio do ajuste utilizado nas curvas que relaciona as temperaturas críticas (Ar_3 e Ar_1) em função da taxa de resfriamento ($^{\circ}\text{C/s}$), esse modelo possibilita prever as temperaturas críticas de transformação de fases para um determinado intervalo de taxas de resfriamento proposto.

$$T = y_0 + A * \exp(B * \text{taxa}) \quad (4)$$

A simulação da cinética de decomposição da austenita em perlita durante o resfriamento contínuo, foi realizada a partir dos valores das constantes de ajustes gerados pela aplicação dos modelos JMAK (Equação 2) e Ferrita-Tempo (Equação

3) às curvas de Fração de Perlita formada em relação ao Tempo, obtidas experimentalmente para cada taxa de resfriamento. Para obtenção das curvas simuladas de Fração de Perlita formada em relação ao Tempo, para cada um dos modelos e condição de resfriamento, considerou-se o início da transformação como sendo o tempo referente a 2% de fração de perlita formada e o tempo final de transformação como sendo aquele referente a 90% de fração de perlita formada.

A partir dos modelos JMAK e Ferrita-Tempo foi possível obter o diagrama TRC simulado para cada aço estudado. Após a determinação dos tempos de início e final de transformação de fases a partir dos dois modelos, foi possível determinar as temperaturas críticas por meio da Equação 1. O Modelo Empírico, também foi utilizado para determinação do diagrama TRC de cada um dos três aços estudados. Esse modelo permitiu prever a cinética de transformação de fases desses aços a partir de qualquer taxa de resfriamento escolhida dentro do intervalo estudado. Dessa forma, considerando a relação funcional empírica, obtida a partir do ajuste da curva de Temperatura Crítica em função da Taxa de resfriamento, dada pela Equação 4, foi possível encontrar as temperaturas crítica Ar_3 e Ar_1 , correspondentes a cada taxa de resfriamento aplicada. Posteriormente, de posse das temperaturas críticas, obteve-se o tempo relacionado a cada uma delas a partir da utilização da Equação 1, obtendo-se, por fim, o diagrama TRC simulado que viabilizou alcançar uma previsibilidade da cinética de transformação de fases em resfriamento contínuo dos aços eutetóides A, B e C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Dilatometria

Como foi descrito no capítulo de Materiais e Métodos, os corpos de prova dos aços A, B e C foram submetidos à mesma condição de austenitização e então resfriados com diferentes taxas. As temperaturas críticas de início e final de transformação perlítica, assim como as temperaturas de início de transformação martensítica foram determinadas. A Figura 1 apresenta, a título de ilustração, as curvas dilatométricas de resfriamento dos aços A, B e C quando submetidos a taxa de resfriamento de 5°C/s . Observa-se que os aços A, B e C, apresentam uma expansão dilatométrica nas temperatura de aproximadamente 662°C , 688°C e 705°C , que é associada à formação de perlita à partir do aço austenitizado. Entretanto, nem toda austenita, nesta condição de resfriamento, teve condições cinéticas de se transformar em perlita, se transformando então, parcialmente, em martensita. Uma segunda expansão nas proximidades de 168°C , 191°C e 190°C , para os aços A, B e C, confirmam a transformação martensítica. Assim sendo, os procedimentos realizados para o estudo da cinética de decomposição da austenita em perlita, assim como sua simulação, foram realizados para as curvas dilatométricas obtidas a partir das taxas de resfriamento de $0,1^\circ\text{C/s}$, $0,5^\circ\text{C/s}$, 1°C/s e $2,5^\circ\text{C/s}$, por meio das quais as microestruturas resultantes, para os aços A, B e C, foram totalmente perlíticas.

Após a determinação das temperaturas Ar_3 e Ar_1 , para cada taxa de resfriamento, foi possível determinar experimentalmente os diagramas TRC dos aços estudados. A Figura 2 apresenta os diagramas TRC dos aços A, B e C.

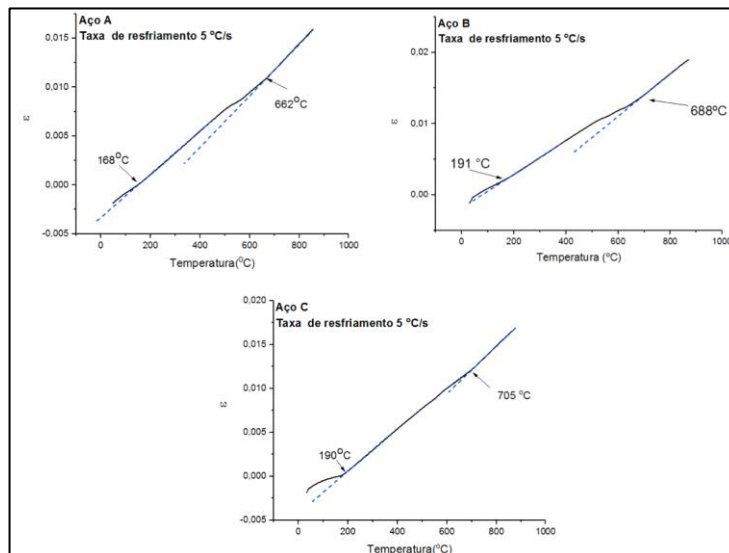


Figura 1. Comparativo entre as curvas dilatométricas de resfriamento dos aços A, B e C para uma taxa de resfriamento de 5°C/s.

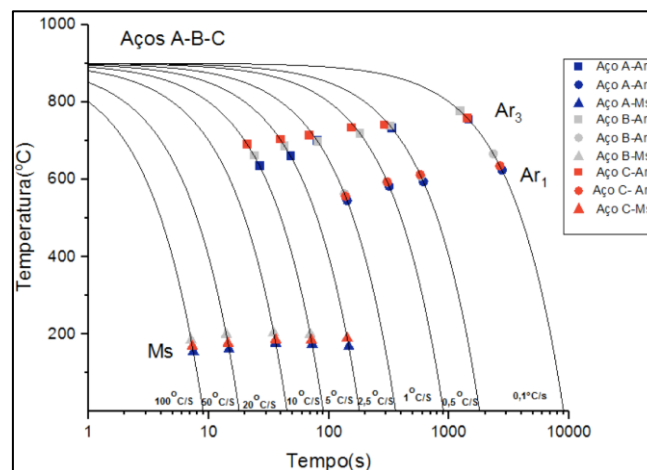


Figura 2. Diagramas TRC dos aços A, B e C determinados experimentalmente a partir dos aços austenitizados a 900°C.

3.2 Cinética de Decomposição da Austenita Durante o Resfriamento Contínuo

O ajuste da Fração da Perlita formada como uma função do Tempo resultou na obtenção dos parâmetros K e n utilizando a Equação 2 (JMAK), e dos parâmetros K, n e T_f utilizando a Equação 3 (Ferrita-Tempo), esses parâmetros são apresentados pela Tabela 2. Observa-se que o modelo Ferrita-Tempo se ajustou melhor aos dados experimentais do que o modelo adaptado de JMAK, para resfriamento contínuo. Verifica-se, também, que os valores de R^2 obtidos pelo modelo Ferrita-Tempo estão mais próximos de 1 em comparação aos valores obtidos pelo modelo JMAK. Ambos os ajustes podem ser visualizados nos gráficos apresentados pelas Figuras 3, 4 e 5.

Tabela 2. Parâmetros obtidos a partir dos ajustes da Equação 2 (JMAK) e da Equação 3 (Ferrita-Tempo) para os aços A, B e C.

Aço	Taxa (°C/s)	Modelo Avrami			Modelo Ferrita Tempo			
		K	n	R ²	K	n	R ²	Tf
A	0,1	4,94E-10	2,77	0,74	1,0E-6	2,941	0,98	591,76
	0,5	1,45E-10	3,66	0,93	2,45E-7	2,798	0,97	546,06
	1	2,0E-13	2,277	0,97	7,41E-7	2,84	0,97	536,36
	2,5	2,86E-10	4,631	0,97	5,86E-6	3,242	0,98	810,45
B	0,1	1,35E-10	2,983	0,83	1,73E-6	2,816	0,98	617,27
	0,5	1,92E-10	3,613	0,87	4,33E-9	3,836	0,99	537,95
	1	3,38E-11	4,337	0,99	1,25E-6	2,895	0,99	565,84
	2,5	2,64E-10	4,652	0,92	8,0E-7	3,436	0,98	739,63
C	0,1	1,29E-15	4,462	0,95	2,98E-4	1,841	0,99	630,93
	0,5	9,54E-13	4,526	0,98	2,93E-6	2,585	0,98	571,49
	1	1,68E-10	4,105	0,98	1,51E-6	2,629	0,98	537,60
	2,5	1,04E-10	4,420	0,98	9,64E-7	2,685	0,99	500,68

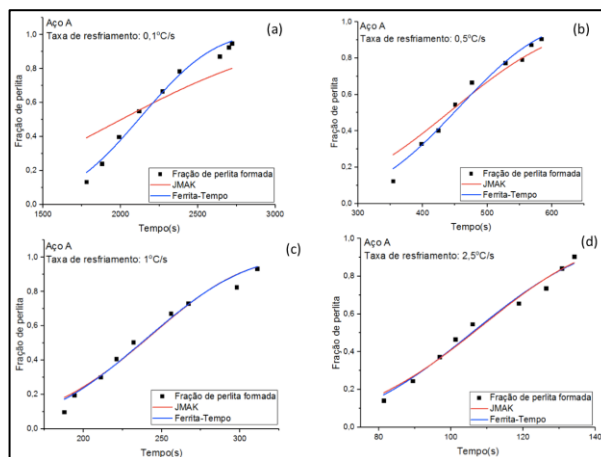


Figura 3. Fração de Perlita formada em função do tempo para o aço A submetido as taxas de resfriamento de 0,1°C/s (a), 0,5°C/s (b), 1°C/s (c) e 2,5°C/s (d).

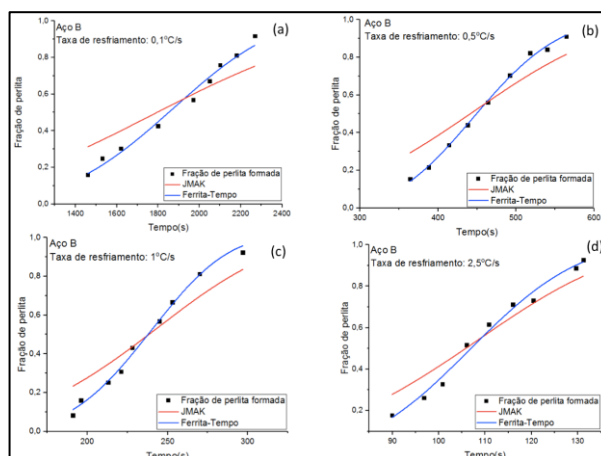


Figura 4. Fração de Perlita formada em função do Tempo para o aço B submetido as taxas de resfriamento de 0,1°C/s (a), 0,5°C/s (b), 1°C/s (c) e 2,5°C/s (d).

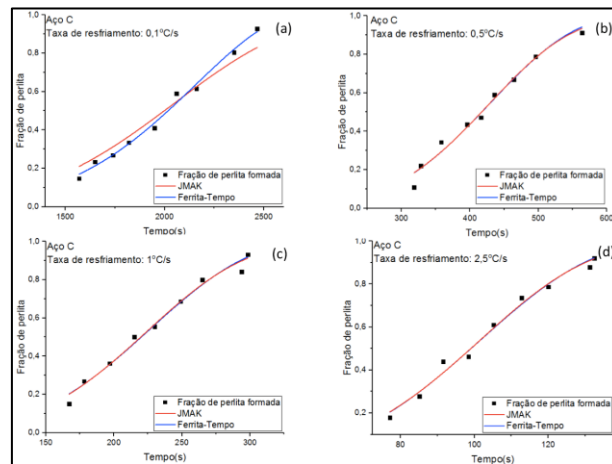


Figura 5. Fração de Perlita formada em função do Tempo para o aço C, submetido as taxas de resfriamento de 0,1°C/s (a), 0,5°C/s (b), 1°C/s (c) e 2,5°C/s (d).

3.3 Simulação da Cinética de Decomposição da Austenita Durante o Resfriamento Contínuo

A partir dos parâmetros apresentados pela Tabela 2, foi possível realizar as simulações da cinética de formação da perlita para os três aços estudados. A primeira simulação foi realizada considerando o modelo JMAK dado pela Equação 2, e a segunda simulação foi realizada considerando o modelo Ferrita-Tempo dado pela Equação 3.

Os gráficos com os pontos experimentais obtidos e as curvas simuladas são apresentados pelas Figuras 6, 7 e 8. Percebe-se que, mesmo que os ajustes realizados pelo modelo JMAK tenham sido qualitativamente inferiores aos ajustes realizados pelo modelo Ferrita-Tempo, pode-se dizer que, a simulação da cinética de formação da perlita, a partir dos modelos analisados, foram satisfatórias para os três aços estudados, dentro do intervalo de taxas de resfriamento estudadas. Entretanto, o modelo Ferrita-Tempo garantiu uma maior aproximação dos dados calculados aos aços experimentais.

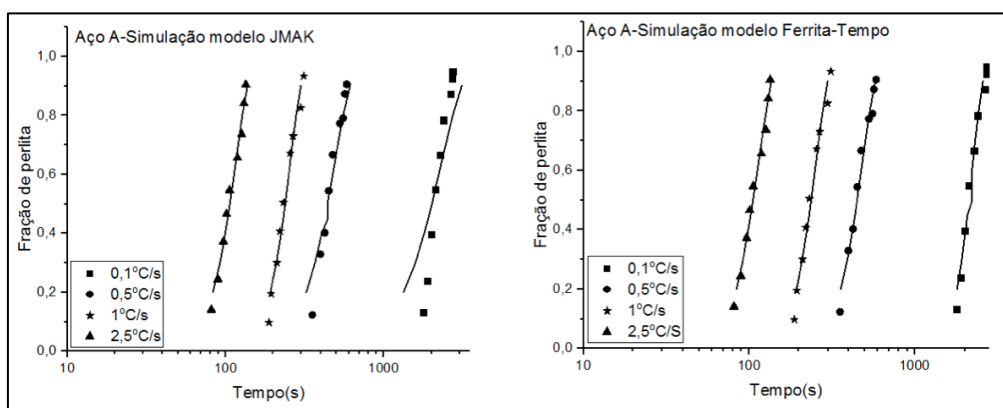


Figura 6. Simulação da cinética de formação de perlita para o aço A considerando Modelo JMAK e Modelo Ferrita-Tempo.

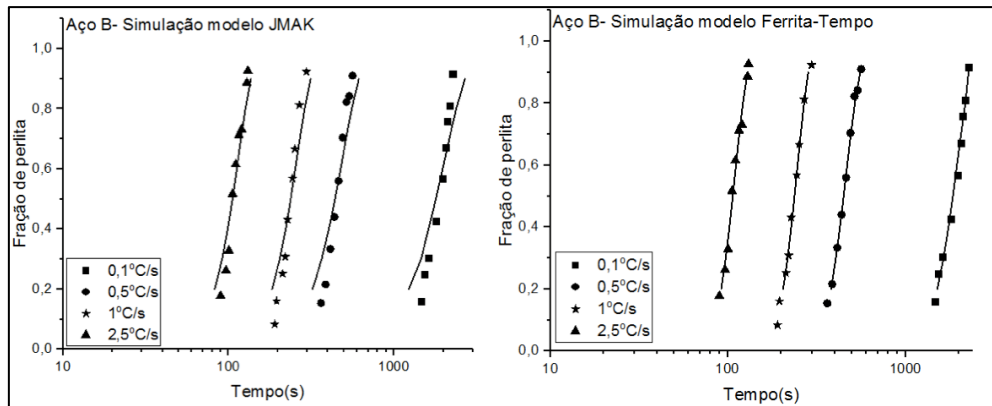


Figura 7. Simulação da cinética de formação de perlita para o aço B considerando Modelo JMAK e Modelo Ferrita-Tempo.

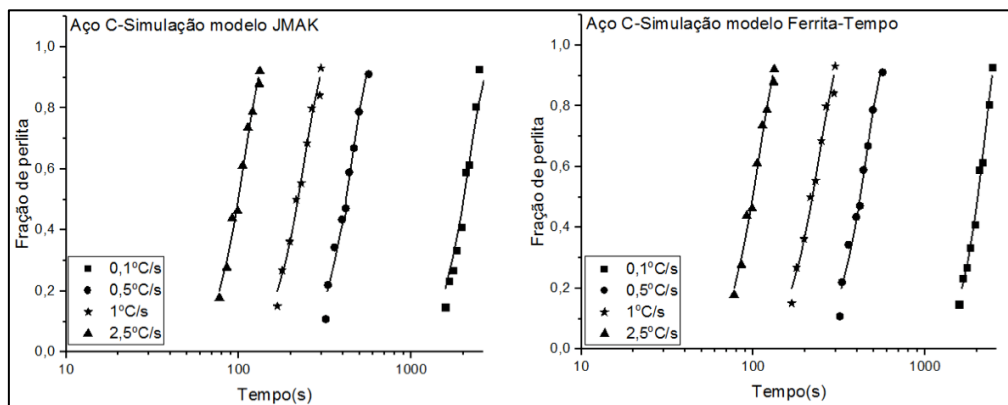


Figura 8. Simulação da cinética de formação de perlita para o aço C considerando Modelo JMAK e Modelo Ferrita-Tempo

Por meio dos modelos JMAK (Equação 2) e Ferrita-Tempo (Equação 3), foram obtidos os diagramas TRC simulados para cada um dos três aços estudados. Além disso, os diagramas TRC dos aços A, B e C, também foram simulados a partir do Modelo Empírico. Esse modelo permitiu prever as temperaturas críticas para uma taxa qualquer no intervalo de dados estudados. A Tabela 3 apresenta as equações empíricas com os valores das constantes obtidas para as temperaturas Ar_3 e Ar_1 . Por meio dessas equações, foram obtidas as temperaturas críticas para cada taxa de resfriamento pertencente ao intervalo de 0,1°C/s a 2,5°C/s, variando 0,1°C/s. Diante dos resultados, pode-se dizer que, para os aços A, B e C, apesar dos ajustes do modelo Ferrita-Tempo terem sido melhores que os ajustes feitos pelo modelo JMAK, as simulações do TRC realizadas por esses dois modelos foram igualmente satisfatórias, para os três aços estudados. No entanto, dentre os três modelos testados, foi observado que o TRC simulado a partir de dados obtidos pelo Modelo Empírico, apresentou temperaturas críticas mais próximas as temperaturas críticas obtidas experimentalmente.

A maior variação das temperaturas críticas apresentadas pelos modelos JMAK e Ferrita-Tempo em relação ao Modelo Empírico, pode ser justificada pelas perturbações apresentadas nas curvas dilatométricas, correspondente ao início e ao final da transformação de fases. Por esse motivo, as simulações realizadas a partir dos modelos JMAK e Ferrita-Tempo foram realizadas considerando a temperatura de início de transformação (Ar_3) referente a 2% de perlita formada, e a temperatura final de transformação (Ar_1) referente a 90% de perlita formada, para todas as taxas de resfriamento estudadas. Assim, pode-se dizer que, para os aços A, B e C os três

modelos podem descrever de forma satisfatória a cinética de formação da perlita durante o resfriamento contínuo.

Tabela 3. Equações empíricas que relacionam as temperaturas críticas com a taxa de resfriamento com os valores das constantes de ajuste para cada aço eutetóide estudado neste trabalho.

Aço	Ar3	Ar1
A	$T = 698,33 + 64,18 * \exp(-1,12 * \text{taxa})$	$T = 528,31 + 100,58 * \exp(-0,7 * \text{taxa})$
B	$T = 698,43 + 92,18 * \exp(-1,52 * \text{taxa})$	$T = 563,51 + 118,99 * \exp(-1,66 * \text{taxa})$
C	$T = 708,09 + 55,10 * \exp(-0,8 * \text{taxa})$	$T = 531,67 + 110,26 * \exp(-0,6 * \text{taxa})$

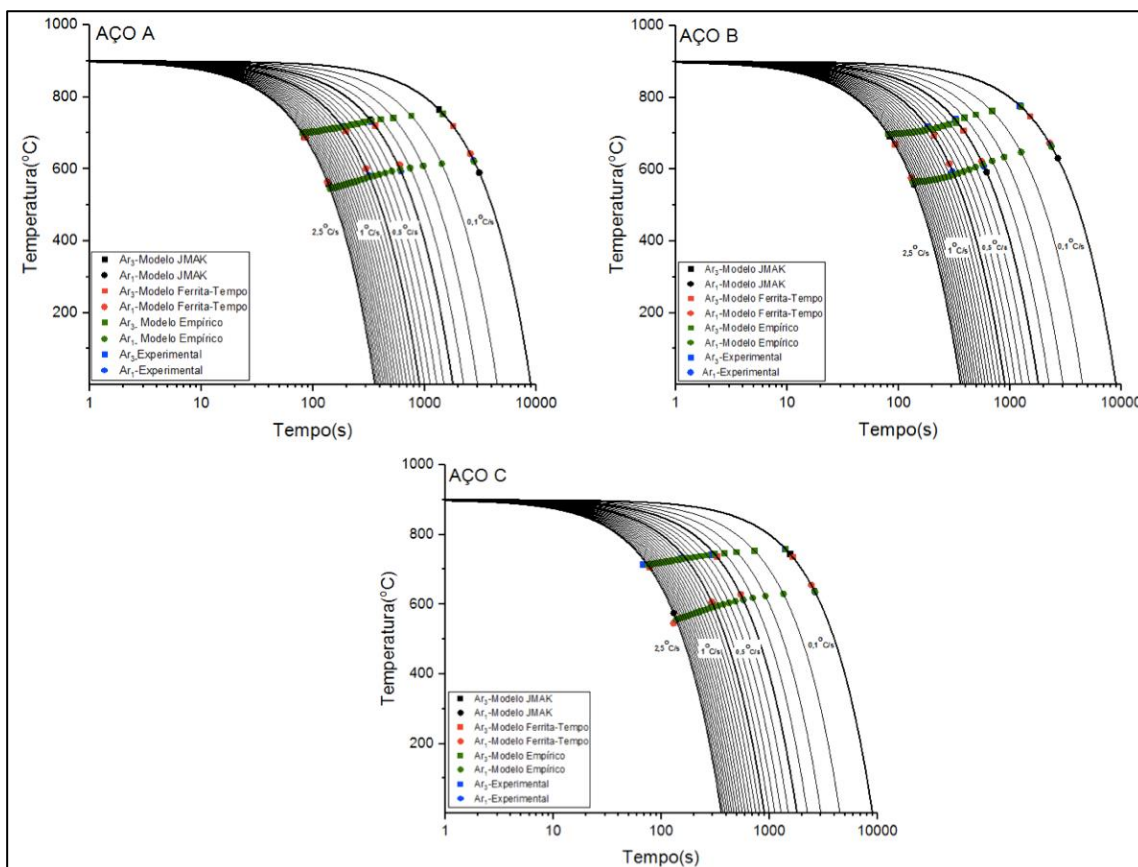


Figura 10. TRC dos aços A,B e C com as temperaturas críticas obtidas experimentalmente e a partir das simulações realizadas pelos modelos JMAK, Ferrita-Tempo e Modelo Empírico.

4 CONCLUSÃO

Para o estudo da cinética de transformação de fases no resfriamento contínuo, a partir dos modelos JMAK e Ferrita-Tempo, observou-se que, para os três aços estudados, a simulação da cinética de formação da perlita por meio dos dois modelos analisados foi satisfatória, porém, o modelo Ferrita-Tempo se ajustou melhor aos dados experimentais. Quanto aos diagramas TRC dos aços A, B e C, constatou-se que as temperaturas críticas determinadas experimentalmente e as temperaturas críticas determinadas a partir das simulações realizadas pelos três modelos utilizados ficaram próximas, entretanto, o Modelo Empírico demonstrou ter

uma melhor previsibilidade da cinética de transformação de fases para os três aços estudados nesse trabalho.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Ouro Preto e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa auxílio de Mestrado e pela bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 GODEFROID LB, MOREIRA LP, VILELA TCG, FARIA GL, CANDIDO LC, PINTO ES. Effect of chemical composition and microstructure on the fatigue crack growth resistance of pearlitic steels for railroad application. *International Journal of Fatigue*.2019;120:241-253.
- 2 PORCARO RR, FARIA GL, GODEFROID LB, APOLONIO GR, CANDIDO LC, PINTO ES. microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail. *journal of materials processing technology*.2019;270:20-27.
- 3 AREMA. *Manual for Railway Engineering*.2013;1.
- 4 FARIA GL, GODEFROID LB, CÂNDIDO LC, PORCARO RR. Caracterização microestrutural e estudo cinético de transformação de fases em dois aços standard e premium de aplicação ferroviária. In Congresso Anual da ABM, 71., 2016, Rio de Janeiro-RJ. Anais. Rio de Janeiro: ABM, 2016.
- 5 CEZARIO ALS. Caracterização e avaliação de modelos de previsibilidade da cinética de transformação de fases austenita/ferrita de três aços IF, 111p. Dissertação de Mestrado, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2018.
- 6 CABALLERO FG, CAPDEVILA C, ANDRÉS CG. modelling of kinetics of austenite formation in steels with different initial microstructures. *ISIJ International*.2001;41(10): 1093-1102.
- 7 LIU Z, OLIVARES RO, LEI Y, GARCIA CI, WANG G. Microstructural characterization and recrystallization kinetics modeling of annealing cold-rolled vanadium microalloyed HSLA steels. *Jornal of Alloys and Compounds*.2016;679:293- 301.
- 8 SHAHRIARI B, VAFAEI R, SHARIFI EM, FARMANESH K. Continuous cooling transformation behavior and the kinetics of bainite formation in a bainitic-martensitic steel. *International Journal of Materials Research*.2017;108:715-724.
- 9 KOISTINEN PP, MARBURGER RE. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation In pure iron-carbon alloys and carbon steel. *Acta Metallurgical*.1959;7: 59-60.
- 10 ANDRÉS CG, CABALLERO FG, CAPDEVILA C, ÁLVAREZ LF. Application of dilatometric analysis to the study of solid-solid phase transformations in steels. *Materials Characterization*.2002;48:101-111.
- 11 CHO YG, YOUNG-ROC IM, LEE JK, SUH DW, KIM SJ, HAN HN. A finite element modeling for dilatometric non-isotropy in steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*.2011;42A:2094.
- 12 ROOSZ A, GACSI Z, FUCHS EG. Isothermal formation of austenite in eutectoid plain carbon steel. *Acta Metallurgica*.1983;31(4): 509-517.