cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Efeito do duplo resfriamento (two-step) na microestrutura e nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular austemperado (ADI) FE 50007

UDESC UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
Maico Jeferson de Souza; Julio Cesar Giubilei Milan; Cesar Edil da Costa.
[1] Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), PGCEM, Joinville, SC

Introdução

O ferro fundido nodular austemperado (ADI) destaca-se por sua microestrutura ausferrítica (ferrita acicular e austenita de alto carbono), apresentando resistência mecânica e ductilidade similares às de algumas classes de aços, porém com custos inferiores de matéria-prima e produção, além da redução de peso devido à grafita nodular. A austêmpera convencional, no entanto, apresenta uma limitação na relação entre resistência mecânica e tenacidade. Diante disso, este estudo investiga a aplicação da austêmpera em dois estágios (Two-Step), introduzindo um rápido resfriamento inicial a 260 °C, aumentando a nucleação da ferrita.

Objetivos

Avaliar o efeito de um tratamento térmico de austêmpera (ADI) em dois estágios (Two-Step) sobre a resistência mecânica e ductibilidade do ferro fundido nodular.

Metodologia

Material: FE 50007 (GGG-50);

Caracterização:

- Composição Química: C (3,61%), Si (2,29%), Mn (0,23%), P (0,023%) S (0,012%) Cu (0,257%) e Mg (0,061%).
- 213 nódulos/mm²; 92 % de nodularização.
- Carbone Equivalente: 4,377% (Hipereutético)

Tratamento Térmico (Austêmpera):

- Austenitização: 900 °C por 1 h.
- Austêmpera Convencional: Estágio único (290 °C, 330 °C, 380 °C) por 1h.
- Austêmpera Two-Step: 1º Estágio (Nucleação) a 260 °C / 1 min + 2º Estágio a 290 °C, 330 °C, 380 °C por 1h.

Ensaios: MO, MEV, EBSD, DRX (ASTM E975), dureza Brinell, tração e impacto Charpy.

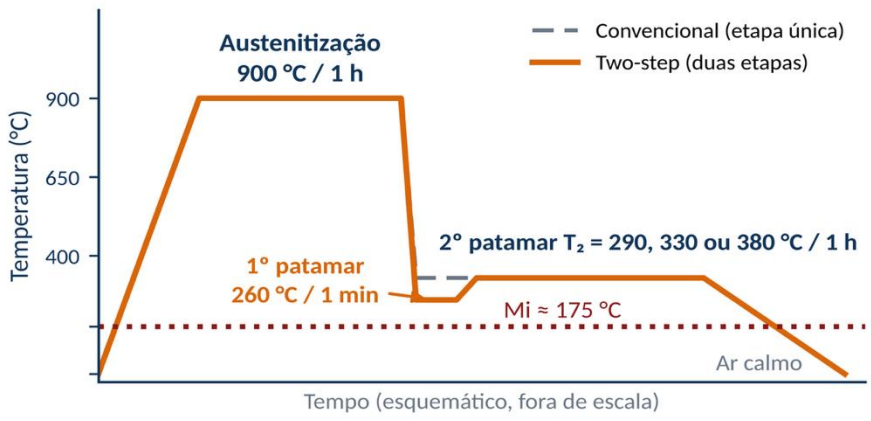


Figura 1. Ciclos térmicos: austêmpera convencional e two-step.

Resultados e Discussão

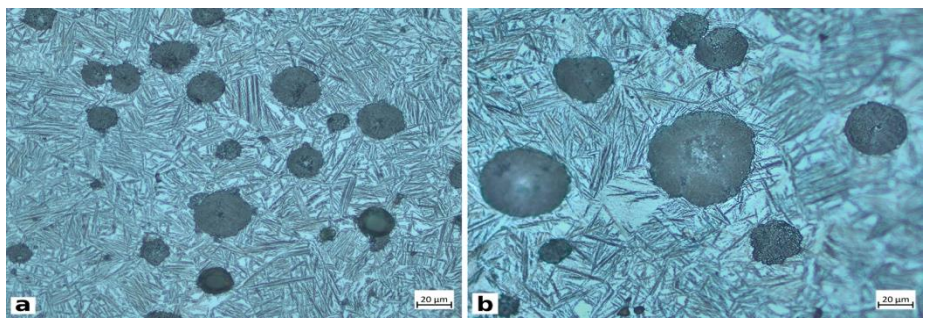


Figura 2. M.O. (500x), austêmpera 380 °C: (a) austêmpera convencional; (b) Two-Step.

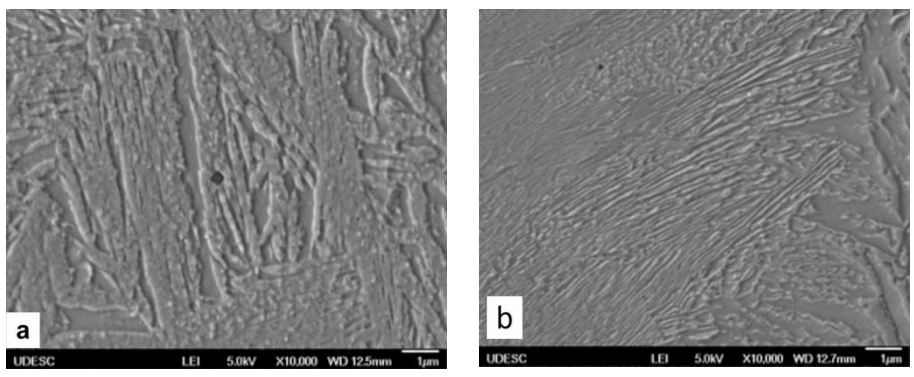


Figura 3. MEV (10.000x), austêmpera 380 °C: (a) austêmpera convencional; (b) Two-Step.

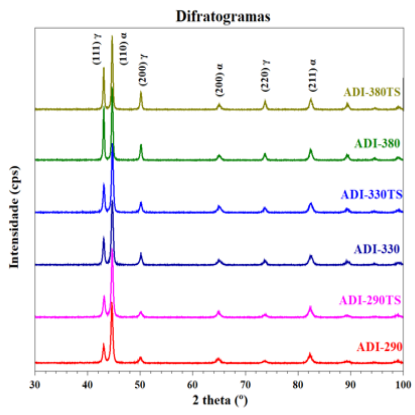


Figura 4. Difratogramas DRX (α: ferrita; γ: austenita).

T_2 (°C)	Rota	Xγ (%)	Cγ (%)
290	Única	29	2,05
290	**Duas**	**30**	**1,94**
330	Única	34	1,97
330	**Duas**	**36**	**1,98**
380	Única	45	1,97
380	**Duas**	**47**	**2,02**

Tabela 1. Fraçãovolumétrica (Xγ) e teor de carbono (Cγ) da austenita.

T_2 (°C)	Austêmpera	HB	LE (MPa)	RT (MPa)	AL (%)	Imp. (J)
290	Convencional	407	1217	1314	2,85	67
290	**Two-Step**	**428**	**1314**	**1512**	**2,82**	**68**
330	Convencional	371	1034	1295	3,94	119
330	**Two-Step**	**376**	**1120**	**1318**	**4,59**	**126**
380	Convencional	321	840	1052	10,52	149
380	**Two-Step**	**340**	**871**	**1129**	**12,12**	**155**

Tabela 2, Resultados Dureza Brinell (HB), limite de escoamento (LE), resistência à tração (RT), alongamento (AL) e impacto.

Conclusões

O ciclo Two-Step elevou simultaneamente a resistência e ductilidade do ADI. O patamar de 260 °C/ 1 minuto, aumentou a nucleação, refinou a matriz ausferrítica, gerando ganhos em relação ao ciclo convencional:

Resistência (290 °C): Ganhos de +15% à tração, +8% no escoamento e +5,2% na dureza.

Ductilidade (330 °C): Aumento de +16,5% no alongamento e +5,9% no impacto.

Microestrutura: Maior fração de austenita retida (Xγ) em todas as temperaturas, com pico de 47% (a 380 °C), garantindo a estabilidade da liga.

Referências e Agradecimentos

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E975-13: Standard practice for X-ray determination of retained austenite in steel. West Conshohocken: ASTM, 2013. PUTATUNDA, S. K. Development of austempered ductile cast iron (ADI) with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process. Materials Science and Engineering: A, v. 315, p. 70-80, 2001. YANG, J.; PUTATUNDA, S. K. Effect of microstructure on abrasion wear behavior of austempered ductile cast iron (ADI) processed by a novel two-step austempering process. Materials Science and Engineering: A, v. 406, n. 1-2, p. 217-228, 2005. Agradecimentos: CMU/CCT/UDESC, CAPES, SENAI Joinville, Castertech, Temperaville e Durafer.