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

Influência da Microestrutura Inicial e dos Parâmetros de Tratamento de Cementação sobre as Propriedades Mecânicas do Aço DIN 16MnCrS5

Luciane Rodrigues Adorno[1]; Márcio Roberto da Rocha[2]
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, SC, Brasil

Introdução

- Cementação gasosa
- Parâmetros do processo
- Desafio metalúrgico

Objetivos

Avaliar a influência do potencial de carbono e dos tempos de enriquecimento e difusão sobre a profundidade efetiva, a dureza e a microestrutura da camada cementada do aço DIN 16MnCrS5, visando reduzir o tempo do ciclo sem comprometer os requisitos metalúrgicos.

Metodologia

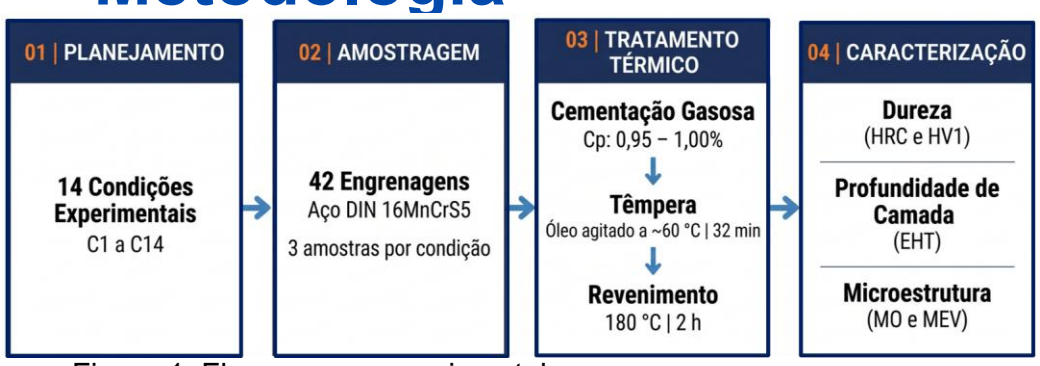


Figura 1. Fluxograma experimental.

Parâmetros dos ciclos

Cond.	Cp[1] (%)	Enriq. (min)	Dif. (min)	Total (min)	Cond.	Cp[1] (%)	Enriq. (min)	Dif. (min)	Total (min)
C1	0,95	555	—*	858	C8	0,95	415	90	733
C2	0,95	555	—	768	C9	0,95	385	90	703
C3	0,95	555	90	858	C10	0,95	575	—	788
C4	0,95	555	60	828	C11	0,95	575	90	878
C5	0,95	555	30	798	C12	1,00	350	60	653
C6	0,95	465	90	783	**C13**	**1,00**	**320**	**60**	**623**
C7	0,95	435	90	753	C14	1,00	300	60	603

Tabela 1. Parâmetros dos ciclos.[1]Potencial de carbono no enriquecimento. Enriq: enriquecimento; Dif: patamar programado de difusão.
— Sem patamar programado de difusão. C1: ciclo de referência com permanência adicional de 90 min.

Critérios de Avaliação

Propriedade avaliada	Critério de aceitação	Unidade
Dureza superficial	60 - 64	HRC
Dureza do núcleo	≤38	HRC
Profundidade efetiva (EHT)	1,05 a 1,55	mm
Austenita retida estimada	≤15	%
Carbonetos	Isento	-

Tabela 2. Critérios de aceitação do produto.

Resultados e Discussão

As durezas superficial e do núcleo atenderam aos critérios nas 14 condições. A conformidade foi determinada principalmente pela EHT, pela austenita retida estimada e pela ocorrência de carbonetos.

Perfis de Microdureza

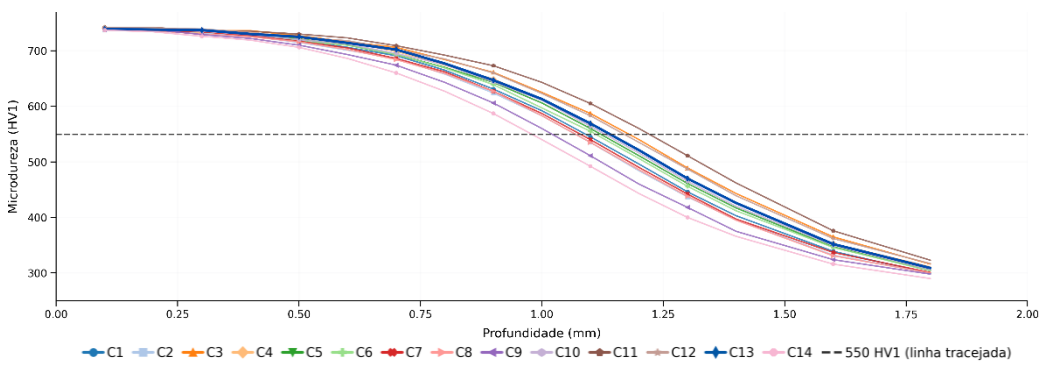


Figura 2. Perfis de microdureza HV1 das 14 condições. C13 está destacada; a linha tracejada indica 550 HV.

Tempo total x EHT x Classificação

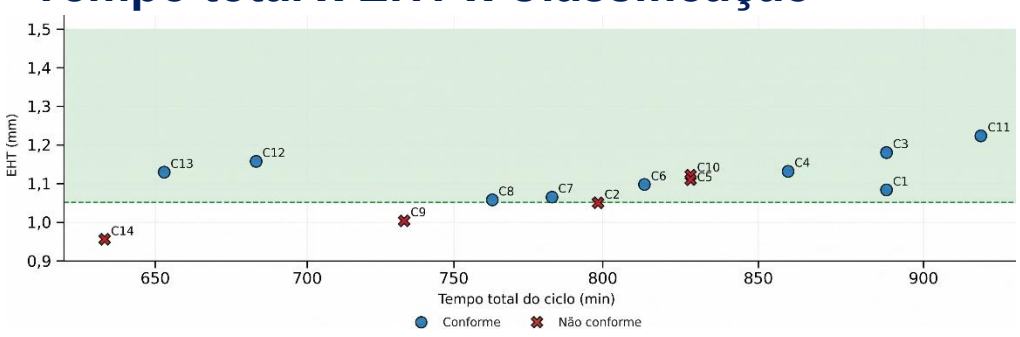


Figura 3. Relação entre tempo total, EHT e classificação global das condições experimentais.

Comparação Microestrutural

C10 - Carbonetos em rede

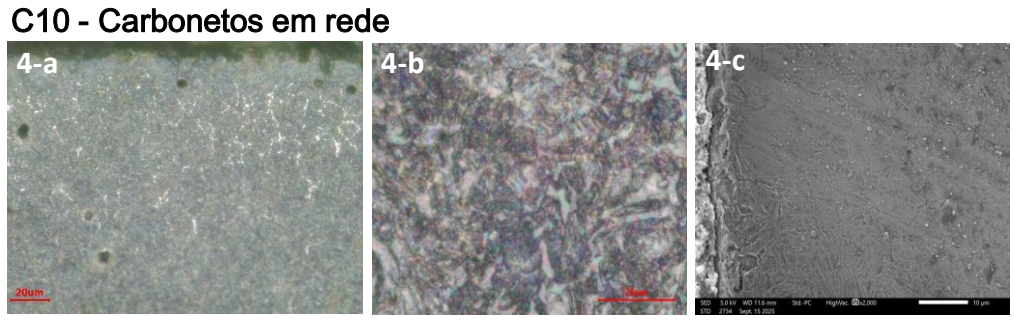


Figura 4. (a) Micrografia da região da camada, (b) núcleo e (c) MEV.

C11 - Condição conforme

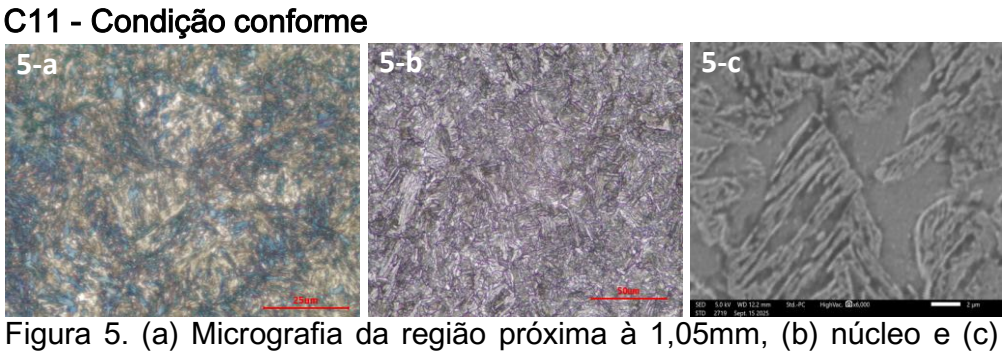


Figura 5. (a) Micrografia da região próxima à 1,05mm, (b) núcleo e (c) MEV.

C13 - Condição selecionada

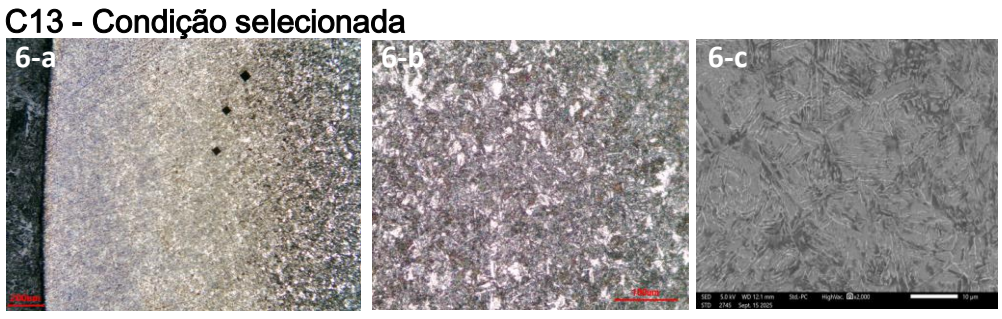


Figura 6. (a) Micrografia da região mais externa até núcleo, (b) núcleo e (c) MEV.

C10 apresentou 15,8% de austenita retida estimada e carbonetos em rede; C11 apresentou 4,8% e ausência de carbonetos. A dureza isolada não assegurou conformidade microestrutural.

C13: Melhor compromisso entre tempo e conformidade

623 min Tempo total	**1,14 mm** EHT	**63,1 HRC** Dureza Superficial
34,5 HRC Dureza núcleo	**4,6%** Austenita retida	**Carbonetos ausentes**

Tempo, Capacidade e Energia

235 min/ciclo Redução de tempo: 27,4 %	**+37,7%** Capacidade teórica de processamento	**181 kWh/carga** Diferença energética C1 (663,1 kWh) > C13 (481,5 kWh)

Conclusões

- A EHT, a austenita retida e os carbonetos foram determinantes para a classificação das condições.
- A dureza superficial, isoladamente, não assegurou conformidade metalúrgica.
- A redução excessiva do enriquecimento resultou em EHT insuficiente.
- C13 apresentou o melhor compromisso entre tempo e conformidade metalúrgica, com redução de 27,4% no ciclo, potencial de maior capacidade e menor consumo de energia/carga.

Referências e Agradecimentos

1. VILIŠ, J. et al. The effect of changing the temperature of the vacuum carburizing process on the layer properties of steels used in the automotive industry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 137, p. 2823–2833, 2025. DOI: 10.1007/s00170-025-15319-y.
2. MADU, M. J. et al. The influence of carburization parameters on the mechanical behavior of mild steel: a review. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 72, n. 1, 2025. DOI: 10.1186/s44147-025-00776-9.
3. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18203:2026: Steel-Determination of the thickness of surface-hardened layers**. 2. ed. Geneva: ISO, 2026.