

MONITORAMENTO TÉRMICO DE AÇO SAE 1020 DURANTE RESFRIAMENTO UTILIZANDO UM SISTEMA AUTÔNOMO DE AQUISIÇÃO COM ESP32

Amanda de Lima Peres¹, Ricky Nemer Ribeiro², Vitor Trugilho Zardo³, Sayd Farage David⁴.

¹Instituto Federal do Espírito Santo, Rodovia – 482 Fazenda Morro Grande – 29311-970 - Cachoeiro de Itapemirim – ES, Brasil, amandalimaperes@gmail.com, rickynemer@hotmail.com, vitruzardo@gmail.com, saydfd@ifes.edu.br.

Resumo

O presente estudo avaliou a aplicação de um sistema autônomo de monitoramento térmico (TMDS), desenvolvido com ESP32, termopar tipo K e conversor MAX6675, para registrar a curva de resfriamento contínuo do aço SAE 1020 ($\approx 0,20\%$ C) a partir de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ em condição de ar parado. O aparato foi configurado com sensor inserido no interior da amostra, assegurando maior fidelidade térmica em relação às medições superficiais. Os resultados mostraram três regiões distintas na curva: $1000,0\text{--}769,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, com taxa média de $193,0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, associada ao início da transformação austenita $\rightarrow$ ferrita; $769,8\text{--}605,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, com taxa média de $86,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, compatível com a formação de perlita; e $605,6\text{--}400,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, com taxa média de $39,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, representando o resfriamento das fases já formadas. O sistema demonstrou estabilidade operacional, baixo custo e alta replicabilidade, configurando-se como ferramenta promissora para experimentos didáticos e laboratoriais em ciência dos materiais, com potencial de integração futura a análises microestruturais e condições diversas de resfriamento.

Palavras-chave: Aço SAE 1020. Resfriamento contínuo. Transformações de fase. ESP32. Monitoramento térmico.

Área do Conhecimento: Engenharias – Engenharia Mecânica

Introdução

O controle térmico em tratamentos aplicados a ligas metálicas é um dos fatores mais relevantes para a obtenção de microestruturas estáveis e adequadas às propriedades mecânicas desejadas. Nos aços hipoeutetóides, como o SAE 1020, que apresenta teor de carbono entre $0,18\%$ e $0,23\%$ em sua composição, o monitoramento da taxa de resfriamento é determinante para o estudo da cinética de transformação de fase. A relação direta entre a velocidade de extração de calor e a formação de fases como ferrita, perlita, bainita ou martensita já é bem estabelecida na literatura, constituindo parte fundamental da compreensão dos mecanismos de transformação em ligas ferrosas (Calliste Jr., 2020). Nesse sentido, compreender e registrar a curva de resfriamento do aço 1020 representa não apenas um exercício acadêmico, mas também uma oportunidade de consolidar conhecimentos aplicáveis ao projeto de tratamentos térmicos industriais.

Para aços com teores hipoeutetóides, a sequência de transformações durante o resfriamento a partir da região austenítica envolve, de forma típica, a nucleação e crescimento de ferrita proeutetóide, seguida da formação de perlita eutetóide. Apenas em situações de resfriamento mais acelerado, observam-se formações de bainita ou, em condições extremas, martensita (Santos, 2015). A caracterização dessas transformações depende da análise detalhada da curva térmica da amostra, a qual registra inflexões correspondentes às liberações de calor latente durante as mudanças de fase. A partir desse tipo de dado, torna-se possível correlacionar experimentalmente a cinética do resfriamento com os diagramas de fases e com as curvas de Transformação em Tempo-Temperatura (TTT) ou de Transformação Contínua em Resfriamento (CCT).

Historicamente, o estudo da cinética de transformação em aços foi viabilizado por técnicas consagradas, como dilatometria e calorimetria diferencial (DSC/DTA), além de sistemas comerciais de aquisição térmica, que oferecem múltiplos canais de medição e elevada precisão (Oliveira, 2019). Entretanto, esses equipamentos apresentam alto custo de aquisição e manutenção, exigem infraestrutura laboratorial especializada e, em muitos casos, não estão disponíveis em instituições com

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

recursos limitados. Essa barreira tecnológica e financeira restringe o acesso a experimentos fundamentais, sobretudo em ambientes didáticos. Surge, portanto, uma lacuna relevante: a necessidade de desenvolver soluções acessíveis, replicáveis e suficientemente precisas para o registro e análise das transformações térmicas em ligas metálicas.

Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas baseados em hardware aberto tem se mostrado uma alternativa viável. Plataformas como microcontroladores da família Arduino e, mais recentemente, o ESP32, vêm sendo aplicadas em instrumentação científica, associadas a sensores confiáveis de temperatura. Essa tendência busca conciliar precisão aceitável com redução significativa de custos, ampliando a aplicabilidade em ambientes de ensino e pesquisa. Foi a partir dessa demanda que surgiu o sistema TMDS (Temperature Monitoring and Data System), concebido como uma plataforma autônoma de baixo custo para aquisição de temperatura em experimentos térmicos. Construído com microcontrolador ESP32, termopar tipo K e conversor digital MAX6675, o sistema proporciona medições contínuas, com resolução de 0,25 °C, frequência de aquisição ajustável e transmissão de dados via Wi-Fi para um servidor local (Pratikto et al., 2023).

A inovação metodológica do presente estudo está na inserção do sensor térmico no interior do corpo de prova. Essa configuração difere da maioria dos sistemas comerciais, que frequentemente monitoram a superfície do material, sujeita a maiores variações e gradientes térmicos. O posicionamento interno do termopar assegura maior fidelidade no registro da temperatura efetiva da massa metálica, permitindo identificar com clareza os pontos de inflexão da curva de resfriamento (Kus et al., 2015). Tal abordagem é particularmente relevante em aplicações didáticas, pois garante a visualização prática das transformações de fase, estabelecendo correlação direta entre teoria e experimento.

Assim, este trabalho aplica o sistema TMDS para monitorar a curva de resfriamento de um corpo de prova de aço SAE 1020 previamente austenitizado. O objetivo é evidenciar, em condições de resfriamento contínuo em ar parado, as variações térmicas associadas às transformações de fase previstas pelo diagrama Fe-Fe₃C. Dessa forma, busca-se contribuir com uma alternativa experimental de baixo custo, replicável e alinhada a práticas pedagógicas, ampliando as possibilidades de experimentação em laboratórios de materiais. O aparato proposto se apresenta, portanto, como uma ferramenta útil tanto para a formação de estudantes quanto para a condução de pesquisas aplicadas na área de tratamentos térmicos.

Metodologia

O experimento teve como objetivo registrar a curva de resfriamento de um corpo de prova de aço SAE 1020 ($\approx 0,20\%$ C) e correlacionar as variações térmicas registradas com as transformações de fase previstas para esse tipo de aço. Os principais materiais empregados estão descritos na Tabela 1, incluindo dimensões, especificações técnicas e finalidades experimentais.

Tabela 1 – Materiais utilizados no experimento térmico com o aço 1020.

Nº	Item	Descrição Técnica	Finalidade
1	Corpo de prova	Cilindro de aço SAE 1020, Ø ¾" (19,05 mm), altura 1" (25,4 mm)	Amostra metálica para o ensaio térmico
2	Manta térmica flexível	Resistência elétrica de aquecimento controlado	Pré-aquecimento localizado da amostra
3	Forno mufla	Faixa de operação até 1100 °C, com controlador digital	Manutenção da temperatura de austenitização
4	Termopar tipo K	Ponta exposta, faixa de operação até 1100 °C	Medição da temperatura no centro da amostra
5	Sistema TMDS	ESP32 + MAX6675 + interface Wi-Fi	Aquisição e registro contínuo da temperatura

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

6	Broca Ø 2,5 mm	Utilizada para perfuração axial da amostra	Inserção do termopar no centro do cilindro
7	Morsa e furadeira de bancada	Equipamentos de usinagem	Fixação e perfuração do corpo de prova
8	Computador com rede local	Software Flask e planilhas de análise	Armazenamento dos arquivos .txt e processamento
9	Isolamento cerâmico	Fita cerâmica refratária	Proteção térmica do termopar e fios de conexão
10	Suporte de alumina	Base inerte para amostra no forno	Estabilidade térmica e isolamento condutivo

Fonte: Autores.

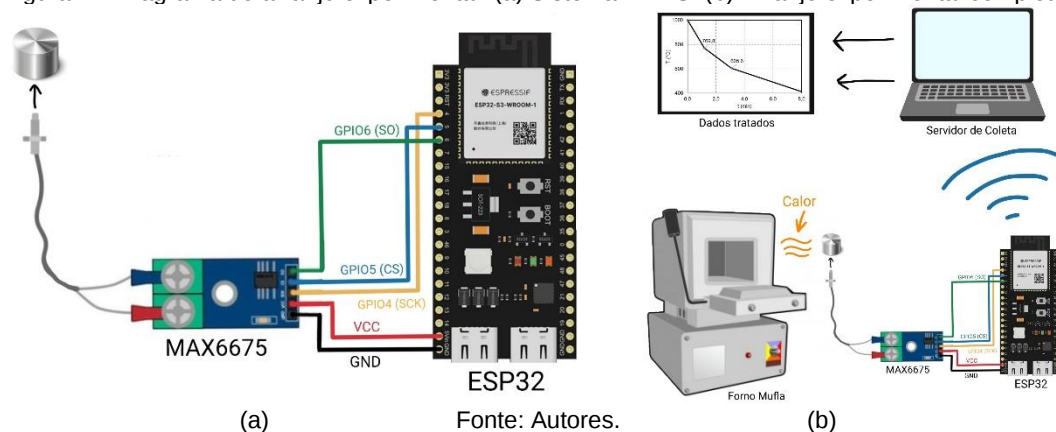
A amostra foi confeccionada a partir de um cilindro de aço SAE 1020, com diâmetro nominal de 19,05 mm ($\frac{3}{4}$ " e altura de 25,4 mm (1"). Para permitir a medição interna da temperatura, foi realizado um furo axial de 2,5 mm de diâmetro e 20 mm de profundidade, usinado em furadeira de bancada com fixação adequada em morsa. Esse procedimento possibilitou a inserção do termopar no interior do corpo de prova, garantindo maior fidelidade térmica.

O termopar tipo K, de ponta exposta, foi inserido no furo central, com o ponto sensível próximo ao centro térmico da amostra. A haste foi revestida por fita cerâmica refratária e só então, o sinal é transmitido ao módulo MAX6675, que realiza a conversão para leitura digital com compensação de junta fria (Santos, 2022). Este módulo foi acoplado ao microcontrolador ESP32, programado para realizar leituras com frequência de 4 Hz. A transmissão dos dados ocorreu via rede Wi-Fi para um servidor local em Flask, com armazenamento automático dos valores em arquivos .txt.

O pré-aquecimento da amostra foi feito por manta térmica flexível por 5 minutos, reduzindo gradientes térmicos. Em seguida, a amostra foi transferida para um forno mufla estabilizado a 880 °C, temperatura suficiente para a completa austenitização do aço SAE 1020 (Santos, 2015). O tempo de permanência foi de 20 minutos, visando homogeneização da microestrutura.

Após esse ciclo, a amostra foi removida e posicionada sobre uma base cerâmica em ambiente de ar parado (aprox. 25 °C, sem fluxo forçado), promovendo resfriamento contínuo e lento. A aquisição de dados prosseguiu até a estabilização abaixo de 100 °C.

Figura 2 – Diagrama do arranjo experimental. (a) Sistema TMDS. (b) Arranjo experimental completo.



Fonte: Autores.

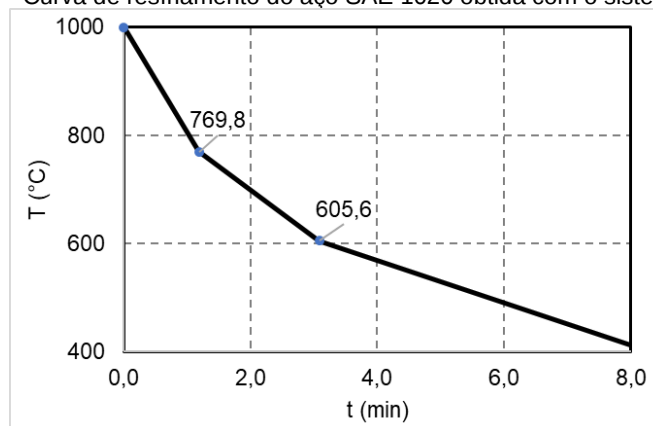
A Figura 2, disposta anteriormente, apresenta o esquema completo do arranjo experimental, incluindo forno, corpo de prova, termopar, sistema de aquisição e servidor local.

Resultados

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

O sistema TMDS operou de forma autônoma durante todo o ciclo térmico, desde a etapa de austenitização até o resfriamento abaixo de 100 °C. A curva de resfriamento do corpo de prova de aço SAE 1020 foi obtida diretamente do ponto central da amostra, assegurando fidelidade térmica. A Figura 3 apresenta a evolução da temperatura em função do tempo.

Figura 3 – Curva de resfriamento do aço SAE 1020 obtida com o sistema TMDS.



Fonte: Autores.

Observa-se que o resfriamento não ocorre de maneira linear, e por isso, três regiões distintas podem ser identificadas na curva. A primeira, entre 1000,0 °C e 769,8 °C, apresentou a maior taxa de resfriamento (193,0 °C/min), compatível com o rápido decréscimo da austenita até a proximidade da temperatura crítica superior (A_{c3}). Nessa faixa, inicia-se a transformação parcial da austenita em ferrita proeutetóide.

Na segunda região, entre 769,8 °C e 605,6 °C, a taxa de resfriamento foi reduzida para 86,5 °C/min. Esse comportamento é explicado pela liberação de calor latente associada à formação de perlita eutetóide. A desaceleração da curva é característica da transformação difusional em aços hipoeutetóides, confirmando que o sistema de aquisição foi capaz de detectar variações sutis no processo.

A terceira região, entre 605,6 °C e 400,0 °C, apresentou a menor taxa média de resfriamento (39,3 °C/min). Nesse intervalo, não há formação de novas fases, apenas o resfriamento das microestruturas já constituídas. A retomada de uma taxa mais acentuada após a transformação perlítica é coerente com o esperado para o aço 1020 em condições de resfriamento contínuo em ar parado.

Tabela 2 – Taxas médias de resfriamento em faixas de temperatura distintas.

Faixa de temperatura (°C)	Intervalo de tempo (s)	ΔT (°C)	Taxa média (°C/min)
1000,0 – 769,8	71	230	193,0 °C/min
769,8 – 605,6	113	164	86,5 °C/min
605,6 – 400	314	205	39,3 °C/min

Fonte: Autores.

Os valores obtidos confirmam a capacidade do sistema em registrar de forma precisa as etapas de transformação do aço SAE 1020. Mesmo com resolução temporal de 4 Hz, foi possível observar inflexões térmicas relevantes, compatíveis com a literatura.

A Figura 5 apresenta um trecho do arquivo de saída gerado automaticamente pelo sistema TMDS, em formato CSV (tempo; temperatura). Esse formato favorece o pós-processamento em softwares de planilha ou programação, permitindo análises adicionais, como cálculo de derivadas da curva para identificar pontos críticos com maior precisão.

Figura 5 – Exemplo do arquivo de dados gerado pelo TMDS durante o resfriamento.

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

```
1697345 ms -> Temperatura: 393.50 °C
1697356 ms -> Temperatura: 391.75 °C
1697347 ms -> Temperatura: 393.25 °C
1697348 ms -> Temperatura: 392.25 °C
1697349 ms -> Temperatura: 392.25 °C
1697350 ms -> Temperatura: 392.00 °C
1697351 ms -> Temperatura: 391.75 °C
1697352 ms -> Temperatura: 392.25 °C
```

Fonte: Autores.

A rastreabilidade e a organização automática dos arquivos reforçam o caráter didático do aparato, permitindo que os resultados sejam replicados em diferentes ensaios. Os dados obtidos demonstram não apenas a viabilidade técnica do sistema TMDS, mas também seu potencial como ferramenta educacional para ilustrar a influência da taxa de resfriamento nas transformações de fase de aços hipoeutetóides.

Discussão

O sistema TMDS demonstrou estabilidade na aquisição de dados térmicos e sensibilidade suficiente para detectar inflexões características da transformação de fases no aço SAE 1020. A curva de resfriamento apresentou três regiões distintas, correspondendo às etapas de resfriamento contínuo descritas pela literatura metalúrgica. Entre 1000 °C e 769,8 °C, a maior taxa média de resfriamento (193,0 °C/min) foi registrada, compatível com a redução de temperatura da austenita até próximo ao limite superior de estabilidade. Na sequência, entre 769,8 °C e 605,6 °C, a queda da taxa para 86,5 °C/min indicou a liberação de calor latente, atribuída à formação de ferrita proeutetóide e perlita. Abaixo de 605,6 °C, o sistema registrou taxa média de 39,3 °C/min, coerente com o resfriamento da microestrutura já formada.

Esses achados se alinham às descrições de Callister (2020) e Santos (2015), que ressaltam a relação entre taxa de resfriamento e evolução microestrutural em aços hipoeutetóides. A identificação das inflexões térmicas, mesmo com resolução de 4 Hz e sensor posicionado internamente, evidencia que o aparato desenvolvido é adequado para detectar transformações de fase qualitativamente. Comparado a métodos tradicionais, como dilatometria e DSC (Oliveira, 2019), o sistema proposto apresenta desempenho satisfatório para fins educacionais e experimentais, ainda que com menor precisão metroológica.

Um aspecto relevante é a fidelidade térmica obtida pela inserção do termopar no centro da amostra. Enquanto muitos sistemas convencionais privilegiam leituras superficiais, o monitoramento interno minimiza efeitos de gradientes térmicos e aproxima os resultados do comportamento real da massa metálica. Essa característica reforça a inovação metodológica e amplia a confiabilidade dos registros.

Do ponto de vista didático, o TMDS mostrou potencial para aplicação em atividades práticas de ensino de ciência dos materiais. A possibilidade de correlacionar diretamente curvas térmicas com diagramas de fases e transformações cinéticas favorece a compreensão de conceitos fundamentais, como nucleação, difusão em estado sólido e influência da taxa de resfriamento na formação microestrutural. Além disso, a geração automática de arquivos em formato .txt facilita o pós-processamento em softwares acessíveis, como planilhas eletrônicas ou ambientes de programação.

Em síntese, a discussão evidencia que o sistema TMDS representa uma alternativa de baixo custo, autônoma e de aplicação prática, capaz de atender tanto à pesquisa experimental quanto ao ensino em tratamentos térmicos. Seu desempenho, associado à simplicidade de operação, contribui para democratizar o acesso a ferramentas de análise térmica em contextos acadêmicos.

Conclusão

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica do sistema TMDS para o monitoramento térmico de ligas metálicas, especificamente no resfriamento contínuo do aço SAE 1020. O aparato, baseado em ESP32, termopar tipo K e conversor MAX6675, operou de forma estável e autônoma, registrando dados confiáveis diretamente no interior do corpo de prova.

A curva de resfriamento obtida revelou três regiões distintas, cujas taxas médias foram de 193,0 °C/min (1000,0–769,8 °C), 86,5 °C/min (769,8–605,6 °C) e 39,3 °C/min (605,6–400,0 °C). Esses resultados confirmaram a sensibilidade do sistema em identificar inflexões térmicas associadas às transformações de fase esperadas para aços hipoeutetóides, como a formação de ferrita e perlita.

Além de comprovar o desempenho técnico, o trabalho evidenciou o potencial didático do TMDS, por oferecer uma alternativa de baixo custo e fácil replicação para ensino e pesquisa em ciência dos materiais. Perspectivas futuras incluem a integração do sistema com análises microestruturais e a avaliação de diferentes condições de resfriamento.

Referências

JR., William D C. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. São Paulo: Grupo GEN, 2020. E-book. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em 24 ago. 2025

KUS, Abdil et al. Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting. **Sensors**, v. 15, n. 1, p. 1274-1291, 2015.

OLIVEIRA, Gabriel Almeida de. **Análise da cinética da transformação isotérmica a 665°C e caracterização dos seus efeitos na microestrutura e na dureza do aço SAE 1080**. 2019. 71 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PRATIKTO *et al.* Temperature data acquisition system for showcase refrigerator based on ESP32 and online remote display. **Sensors and materials**, v. 35, n. 11, p. 3687, 2023.

SANTOS, Givanildo Alves dos. **Tecnologia dos Materiais Metálicos - Propriedades, Estruturas e Processos de Obtenção**. São Paulo: Editora Saraiva, 2015. E-book. ISBN 9788536532523. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536532523/>. Acesso em: 24 ago. 2025

SANTOS, Sara. **ESP32: K-Type Thermocouple with MAX6675 amplifier**. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-k-type-thermocouple-max6675/>. Acesso em: 29 ago. 2025.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) – Termo de Outorga nº 1223/2024 e do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes).