



APLICAÇÕES DO SIMULADOR TERMOMECÂNICO GLEEBLE 563 NA AVALIAÇÃO DE CICLOS TÉRMICOS E MICROESTRUTURAS DE AÇOS PARA USO INDUSTRIAL

TAYNA RAIZZA RIBEIRO - d2023100136@unifei.edu.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI-ITABIRA

IAN DOMINGUES ROLLA - ian.rolla@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI-ITABIRA

ROGÉRIO FERNANDES BRITO - rogbrito@unifei.edu.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI-ITABIRA

JOSÉ CARLOS DE LACERDA - jlacerda@unifei.edu.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI-ITABIRA

RICARDO LUIZ PEREZ TEIXEIRA - ricardo.luiz@unifei.edu.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI-ITABIRA

ÁREA: 01.ENG. DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DA PRODUÇÃO

SUBÁREA: 1.5 - PROCESSOS PRODUTIVOS DISCRETOS E CONTÍNUOS:
PROCEDIMENTOS, MÉTODOS

RESUMO: O SIMULADOR TERMOMECÂNICO GLEEBLE 563 É UMA FERRAMENTA AMPLAMENTE EMPREGADA NA REPRODUÇÃO CONTROLADA DE CICLOS TÉRMICOS E MECÂNICOS APLICADOS A PROCESSOS METALÚRGICOS INDUSTRIAIS. ESTE TRABALHO APRESENTA UMA REVISÃO DOS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DESSE EQUIPAMENTO E DE SUAS APLICAÇÕES NA AVALIAÇÃO DE TRANSFORMAÇÕES MICROESTRUTURAIS EM AÇOS DE ENGENHARIA, COM ÊNFASE NO AÇO SAE 8620. FORAM DISCUTIDOS ASPECTOS RELACIONADOS AO CONTROLE DE TEMPERATURA, DEFORMAÇÃO, TAXAS DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO, BEM COMO SUA INFLUÊNCIA NA FORMAÇÃO DE CONSTITUINTES MICROESTRUTURAIS E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS. OS RESULTADOS REPORTADOS NA LITERATURA INDICAM QUE A SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PERMITE REDUZIR CUSTOS EXPERIMENTAIS, ACELERAR O DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS E OTIMIZAR ROTAS DE PROCESSAMENTO APLICADAS ÀS INDÚSTRIAS SIDERÚRGICA E METALMECÂNICA. CONCLUI-SE QUE O GLEEBLE 563 REPRESENTA UMA FERRAMENTA ESTRATÉGICA PARA ESTUDOS ENVOLVENDO TRANSFORMAÇÕES DE FASE, CONTROLE MICROESTRUTURAL E DESENVOLVIMENTO DE AÇOS PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS.

PALAVRAS-CHAVES: GLEEBLE 563; SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA; TRATAMENTOS TÉRMICOS; AÇOS LIGA; ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

A crescente competitividade dos setores siderúrgico, automotivo e metalmeccânico tem ampliado a demanda por materiais com propriedades mecânicas cada vez mais específicas, exigindo maior controle dos fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante o processamento térmico e termomecânico. Nesse contexto, a compreensão das relações entre parâmetros de processo, evolução microestrutural e desempenho mecânico tornou-se fundamental para o desenvolvimento de materiais e para a otimização de rotas produtivas (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Tradicionalmente, a avaliação de novos ciclos térmicos e de condições de processamento exige a realização de testes industriais em escala real, o que envolve elevados custos operacionais, consumo de matéria-prima e restrições à disponibilidade dos equipamentos produtivos. Como alternativa, a simulação termomecânica tem sido amplamente utilizada para reproduzir, em ambiente laboratorial, condições térmicas e mecânicas representativas dos processos industriais, permitindo a investigação controlada dos mecanismos de transformação de fases e de evolução microestrutural (BORBA, 2019; BORBA; MODENESI, 2019).

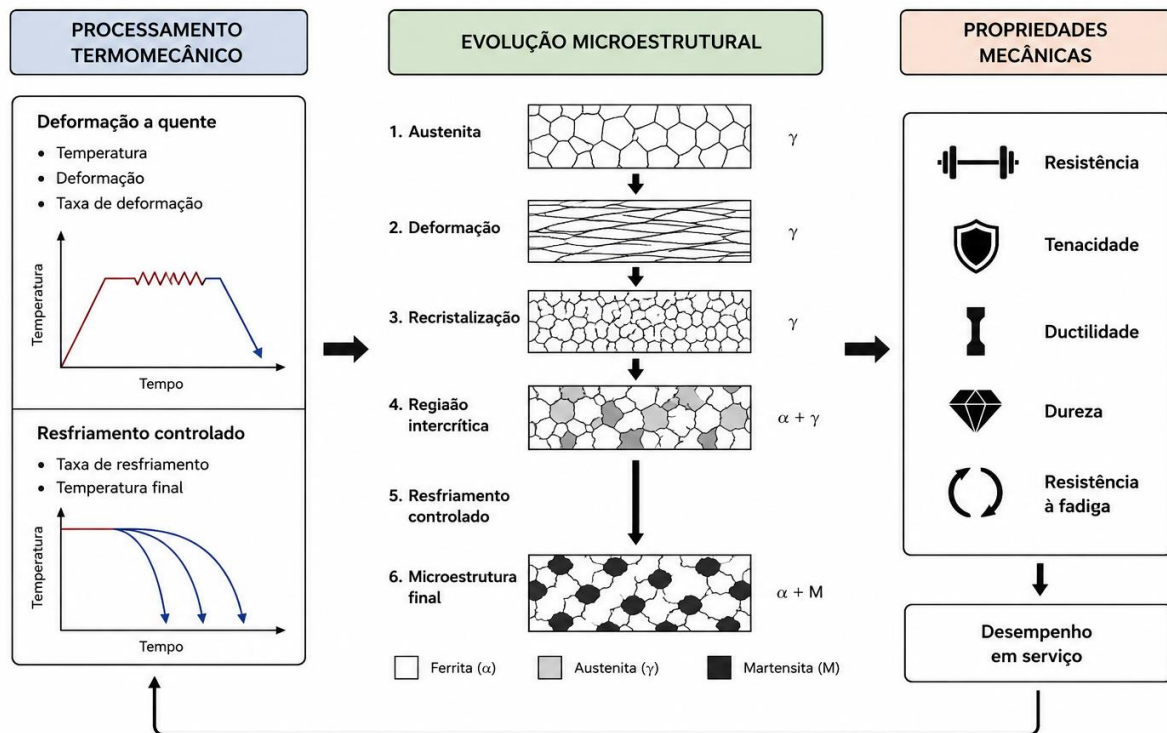
Entre os equipamentos empregados para essa finalidade, destaca-se o simulador termomecânico Gleeble 563, capaz de reproduzir ciclos complexos de aquecimento, resfriamento e deformação, com elevado grau de controle experimental. A utilização desse equipamento possibilita a avaliação de fenômenos associados à soldagem, laminação, tratamentos térmicos e conformação mecânica, permitindo correlacionar as condições de processamento às propriedades finais dos materiais (SILVA *et al.*, 2021).

A aplicação da simulação termomecânica em aços de engenharia tem demonstrado grande potencial para o estudo das transformações de fase, do crescimento de grão e da obtenção de microestruturas bifásicas, contribuindo para o desenvolvimento de materiais com desempenho otimizado. Estudos recentes envolvendo o aço SAE 8620 evidenciam que a reprodução controlada de ciclos térmicos permite avaliar a influência da temperatura de tratamento e da taxa de resfriamento na formação de ferrita, perlita, bainita e martensita, bem como nas propriedades mecânicas resultantes (AGREDO-DIAZ *et al.*, 2021).

A relação entre as etapas de processamento, as transformações microestruturais e as propriedades mecânicas pode ser representada de forma simplificada conforme apresentado na Figura 1.

FIGURA 1 – Relação entre o processamento termomecânico, a evolução microestrutural e as

propriedades mecânicas.



Fonte: elaborada pelos autores (2026).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo apresentar os princípios de funcionamento do simulador termomecânico Gleeble 563 e discutir suas aplicações no desenvolvimento de aços para uso industrial, com ênfase na reprodução de ciclos térmicos controlados e na avaliação da influência do processamento sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas dos materiais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Simulação termomecânica

A simulação termomecânica consiste na reprodução controlada de ciclos térmicos e mecânicos em escala laboratorial, permitindo avaliar a influência de variáveis de processo na evolução microestrutural e no comportamento mecânico dos materiais. Essa abordagem tem sido amplamente empregada no desenvolvimento de ligas metálicas, uma vez que possibilita reproduzir condições semelhantes às encontradas em processos industriais, como laminação, forjamento, soldagem e tratamentos térmicos (BORBA, 2019; BORBA; MODENESI, 2019).

O princípio fundamental da simulação termomecânica está associado ao controle simultâneo de parâmetros como temperatura, tempo de permanência, taxas de aquecimento e

de resfriamento e deformação aplicada. A combinação dessas variáveis permite reproduzir históricos térmicos específicos e avaliar sua influência sobre os mecanismos de transformação de fase, o crescimento de grão e o desenvolvimento de tensões internas (SHACKELFORD, 2008).

Nos materiais ferrosos, as transformações microestruturais são fortemente dependentes do histórico térmico imposto ao material. Alterações na taxa de resfriamento ou na temperatura de tratamento podem modificar significativamente a formação de ferrita, perlita, bainita e martensita, influenciando diretamente propriedades como resistência mecânica, dureza, ductilidade e tenacidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Dessa forma, a simulação termomecânica constitui uma ferramenta importante para o estudo das relações entre o processamento, a microestrutura e as propriedades.

Uma das principais vantagens dessa técnica é a possibilidade de isolar variáveis específicas de processo, permitindo avaliar seus efeitos de forma independente. Em comparação com testes industriais em escala real, a simulação termomecânica apresenta menor custo operacional, maior flexibilidade experimental e elevada reprodutibilidade dos resultados, fatores que contribuem para sua ampla utilização em atividades de pesquisa, desenvolvimento e otimização de processos industriais (BORBA, 2019; BORBA; MODENESI, 2019).

Além da avaliação de tratamentos térmicos convencionais, a simulação termomecânica tem sido empregada no estudo de zonas termicamente afetadas pela soldagem, no desenvolvimento de aços avançados de alta resistência e na investigação de microestruturas bifásicas obtidas por meio de tratamentos intercríticos. Nessas aplicações, o controle preciso dos parâmetros térmicos permite estabelecer correlações entre as condições de processamento e as características microestruturais obtidas, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de materiais com desempenho otimizado (AGREDO-DIAZ *et al.*, 2021; TASAN *et al.*, 2015).

A utilização de simuladores termomecânicos permite reproduzir condições de processamento em ambiente laboratorial, reduzindo a necessidade de ensaios industriais preliminares e fornecendo informações relevantes para o ajuste de parâmetros térmicos e mecânicos empregados na fabricação de componentes metálicos.

2.2 Simulador termomecânico Gleeble 563

Os simuladores termomecânicos da série Gleeble foram desenvolvidos para reproduzir, em escala laboratorial, condições térmicas e mecânicas representativas de

processos industriais. Esses equipamentos são amplamente empregados em pesquisas envolvendo soldagem, conformação mecânica, tratamentos térmicos, laminação e desenvolvimento de novos materiais metálicos, permitindo a avaliação controlada da influência dos parâmetros de processo sobre a microestrutura e as propriedades dos materiais (DYNAMIC SYSTEMS INC., 2024).

O funcionamento do Gleeble 563 baseia-se no aquecimento resistivo direto da amostra por efeito Joule, obtido pela passagem de corrente elétrica através do corpo de prova. Esse sistema permite elevadas taxas de aquecimento e resfriamento, além de um excelente controle da temperatura ao longo do ciclo térmico. O monitoramento térmico é realizado por meio de termopares soldados diretamente à amostra, permitindo o acompanhamento contínuo da temperatura durante o ensaio (ASM INTERNATIONAL, 2018).

Uma das principais características do equipamento é a capacidade de controlar simultaneamente variáveis térmicas e mecânicas. Dessa forma, podem ser reproduzidos ciclos de aquecimento, resfriamento, compressão, tração e deformação controlada, possibilitando a simulação de fenômenos observados em processos industriais complexos. Essa flexibilidade permite avaliar, isoladamente ou em combinação, os efeitos das condições de processamento na evolução microestrutural dos materiais (BORBA, 2019; BORBA; MODENESI, 2019).

Além da elevada precisão experimental, o Gleeble 563 apresenta vantagens relacionadas à redução do tempo de desenvolvimento de produtos e à diminuição dos custos associados à realização de testes em escala industrial. Em função dessas características, o equipamento tem sido amplamente utilizado em atividades de pesquisa e desenvolvimento voltadas à otimização de processos metalúrgicos e ao desenvolvimento de novos materiais.

As principais características operacionais do simulador termomecânico Gleeble 563 são resumidas na Tabela 1.

TABELA 1 – Principais características operacionais do simulador termomecânico Gleeble 563.

Característica	Aplicação
Aquecimento por efeito Joule	Simulação de ciclos térmicos rápidos
Controle de temperatura por termopares	Monitoramento em tempo real
Controle de deformação	Simulação de laminação, forjamento e soldagem
Elevadas taxas de aquecimento e resfriamento	Reprodução de condições industriais
Aquisição digital de dados	Registro contínuo dos parâmetros de ensaio

Fonte: Adaptado de Dynamic Systems Inc. (2024).

A integração entre controle térmico, deformação mecânica e monitoramento em tempo

real permite investigar a influência das condições de processamento no crescimento de grão, nas transformações de fase e nas propriedades mecânicas dos aços submetidos a diferentes ciclos termomecânicos.

2.3 Transformações de fase em aços

As propriedades mecânicas dos aços estão diretamente relacionadas às transformações microestruturais que ocorrem durante os processos de aquecimento e resfriamento. Essas transformações dependem da composição química do material e do histórico térmico imposto durante o processamento, o que influencia a formação e a distribuição das diferentes fases presentes na microestrutura (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

O comportamento das ligas ferro-carbono pode ser inicialmente compreendido por meio do diagrama de equilíbrio ferro-carbono, que estabelece as regiões de estabilidade das fases ferrita, austenita e cementita em função da temperatura e do teor de carbono. Embora represente condições de equilíbrio raramente encontradas em processos industriais, esse diagrama constitui a base para a compreensão dos tratamentos térmicos aplicados aos aços (SHACKELFORD, 2008).

Em condições reais de processamento, as transformações ocorrem sob resfriamento contínuo, o que torna necessária a utilização de diagramas cinéticos para a previsão das microestruturas formadas. Os diagramas tempo-temperatura-transformação (TTT) e de transformação por resfriamento contínuo (CCT) permitem avaliar a influência da taxa de resfriamento na formação de ferrita, perlita, bainita e martensita, auxiliando na definição de ciclos térmicos adequados para a obtenção das propriedades desejadas (CHANDLER, 1995).

No caso dos aços de baixa liga, pequenas variações na temperatura de tratamento ou na velocidade de resfriamento podem produzir alterações significativas na microestrutura final. Em tratamentos realizados na região intercrítica, compreendida entre as temperaturas A_{c1} e A_{c3} , ocorre a formação simultânea de ferrita e austenita. Quando o resfriamento subsequente é suficientemente rápido, a austenita transforma-se predominantemente em martensita, originando microestruturas bifásicas compostas por ferrita e martensita (TASAN *et al.*, 2015).

Essas microestruturas apresentam uma combinação favorável de resistência mecânica e ductilidade, o que tem despertado interesse crescente em aplicações industriais. Estudos realizados com o aço SAE 8620 demonstram que a temperatura de austenitização intercrítica e a taxa de resfriamento constituem parâmetros fundamentais para o controle da fração

volumétrica de martensita e, consequentemente, das propriedades mecânicas obtidas após o tratamento térmico (AGREDO-DIAZ et al., 2021).

Os principais constituintes microestruturais observados em aços submetidos a tratamentos térmicos são resumidos na Tabela 2.

TABELA 2 – Principais constituintes microestruturais e características gerais observadas em aços.

Constituinte	Características predominantes
Ferrita	Elevada ductilidade e baixa dureza
Perlita	Equilíbrio entre resistência e ductilidade
Bainita	Boa resistência mecânica e tenacidade
Martensita	Elevada dureza e resistência mecânica

Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

O entendimento dessas transformações é fundamental para a utilização da simulação termomecânica como ferramenta de desenvolvimento de materiais, permitindo correlacionar os parâmetros de processo às microestruturas obtidas e às propriedades mecânicas resultantes.

3. MÉTODO DE PESQUISA

3.1 Material

Como estudo de aplicação da simulação termomecânica, foi considerado o aço SAE 8620, amplamente empregado na fabricação de engrenagens, eixos e componentes submetidos a desgaste e fadiga, devido à sua elevada temperabilidade e à boa combinação entre resistência mecânica e tenacidade (FIELD; SUWAS; WRIGHT, 2025).

A composição química típica desse aço é apresentada na Tabela 3.

TABELA 3 – Faixa de composição química do aço SAE 8620.

Elemento	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
% em massa	0,18–0,23	0,70–0,90	0,15–0,35	0,40–0,70	0,40–0,60	0,15–0,25

Fonte: Adaptado do Guia do Aço ArcelorMittal (2019).

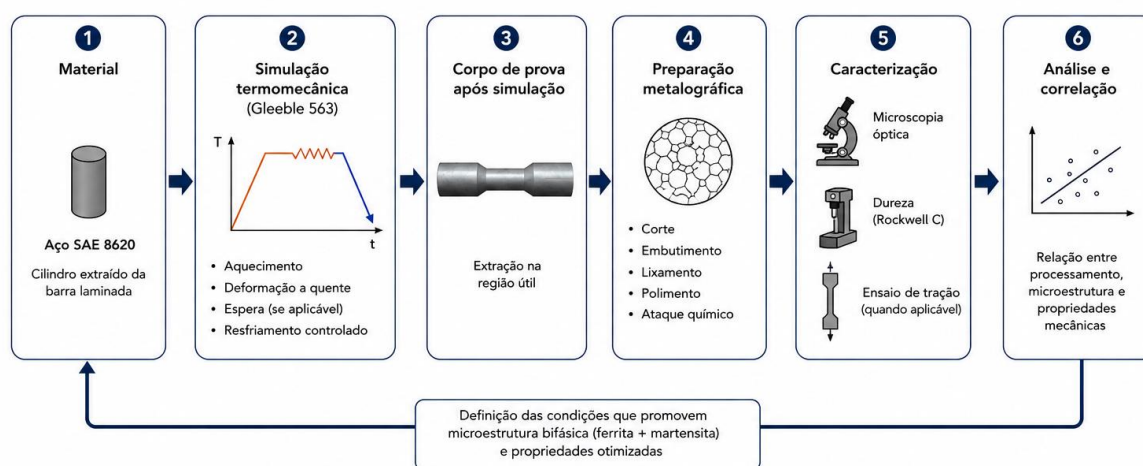
3.2 Simulação termomecânica

Os ciclos térmicos foram reproduzidos no simulador termomecânico Gleeble 563, equipamento capaz de controlar simultaneamente a temperatura, o tempo de permanência, a taxa de aquecimento e a taxa de resfriamento. O aquecimento foi realizado por efeito Joule, e o monitoramento térmico foi efetuado por meio de termopares fixados diretamente aos corpos de prova (ASM INTERNATIONAL, 2018).

Inicialmente, as temperaturas críticas A_{c1} e A_c são determinadas por meio de análise dilatométrica. A partir desses valores, definem-se os tratamentos realizados na região intercrítica, o que permite controlar a quantidade de austenita formada durante o aquecimento (AGREDO-DIAZ et al., 2021).

A sequência metodológica empregada encontra-se representada na Figura 2.

FIGURA 2 – Fluxograma das etapas empregadas na simulação termomecânica e caracterização do aço SAE 8620.



Fonte: Elaborada pelos autores.

3.3 Caracterização microestrutural

Após a aplicação dos ciclos térmicos, as amostras são preparadas segundo procedimentos metalográficos convencionais, incluindo lixamento, polimento e ataque químico. A caracterização microestrutural é realizada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), para identificar os constituintes formados após os tratamentos térmicos (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Para avaliação detalhada da orientação cristalográfica e da distribuição das fases, pode-se empregar a técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD), amplamente utilizada em estudos envolvendo aços bifásicos e transformações de fase (DODDAPANENI et al., 2025; WILKINSON; HIRSCH, 1997).

3.4 Caracterização mecânica

A avaliação das propriedades mecânicas pode ser realizada por meio de ensaios de dureza Rockwell, microdureza Vickers e tração, conforme as normas ASTM aplicáveis. Esses ensaios permitem correlacionar as condições de processamento térmico com a resistência mecânica, a ductilidade e o endurecimento obtidos após os tratamentos realizados (ASTM

E18; ASTM E384).

Os principais parâmetros avaliados durante a simulação termomecânica são resumidos na Tabela 4.

TABELA 4 – Variáveis analisadas durante a simulação termomecânica.

Variável	Objetivo
Temperatura intercrítica	Controle da fração de austenita
Tempo de permanência	Homogeneização térmica
Taxa de aquecimento	Controle cinético das transformações
Taxa de resfriamento	Formação dos constituintes microestruturais
Dureza e microdureza	Avaliação mecânica
Caracterização microestrutural	Identificação das fases formadas

Fonte: Elaborada pelos autores.

A integração entre os resultados microestruturais e mecânicos permite estabelecer correlações entre o processamento, a microestrutura e as propriedades, fornecendo subsídios para a otimização de tratamentos térmicos aplicáveis aos aços de engenharia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A utilização do simulador termomecânico Gleeble 563 possibilita a reprodução controlada de ciclos térmicos representativos de processos industriais, permitindo avaliar a influência dos parâmetros de tratamento na evolução microestrutural e nas propriedades mecânicas dos aços. Conforme discutido na Seção 2, a temperatura intercrítica e a taxa de resfriamento desempenham um papel determinante na formação dos constituintes microestruturais apresentados na Tabela 2.

No caso do aço SAE 8620, os tratamentos realizados na faixa de temperaturas entre Ac1 e Ac3 favorecem a formação simultânea de ferrita e austenita. Durante o resfriamento subsequente, parte da austenita transforma-se em martensita, originando microestruturas bifásicas cuja fração volumétrica depende diretamente das condições de processamento adotadas (AGREDO-DIAZ et al., 2021).

A sequência metodológica apresentada na Figura 2 permite compreender a correlação entre as etapas de aquecimento, tratamento intercrítico, resfriamento e caracterização dos materiais. A aplicação desse procedimento contribui para a avaliação sistemática dos efeitos dos parâmetros térmicos sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas resultantes.

Os parâmetros experimentais resumidos na Tabela 4 evidenciam que a temperatura intercrítica, o tempo de permanência e a taxa de resfriamento constituem as principais

variáveis de controle do processo. Alterações nesses parâmetros modificam a estabilidade da austenita durante o aquecimento e influenciam diretamente a formação de martensita durante o resfriamento (TASAN *et al.*, 2015).

Estudos conduzidos em aços de baixa liga demonstram que o aumento da fração de martensita eleva a dureza e a resistência mecânica, enquanto maiores frações de ferrita tendem a favorecer a ductilidade do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Dessa forma, a definição adequada dos ciclos térmicos permite ajustar o equilíbrio entre resistência e ductilidade conforme os requisitos da aplicação industrial.

A utilização de técnicas complementares de caracterização, como microscopia eletrônica de varredura e difração de elétrons retroespalhados (EBSD), amplia a compreensão dos mecanismos envolvidos nas transformações de fase e no refinamento microestrutural. Conforme relatado por Doddapaneni *et al.* (2025) e Wilkinson e Hirsch (1997), essas técnicas permitem identificar a distribuição das fases, avaliar a orientação cristalográfica e correlacionar os resultados microestruturais com o desempenho mecânico obtido.

Os resultados disponíveis na literatura indicam que a simulação termomecânica constitui uma ferramenta eficiente para a redução de custos experimentais e a otimização de rotas de processamento aplicadas à indústria siderúrgica. Nesse contexto, o Gleeble 563 apresenta potencial para acelerar o desenvolvimento de materiais, reduzir as etapas de validação industrial e ampliar a compreensão dos fenômenos metalúrgicos associados aos tratamentos térmicos de aços de engenharia.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da literatura demonstra que a simulação termomecânica constitui uma ferramenta relevante para a investigação das relações entre o processamento, a microestrutura e as propriedades mecânicas dos aços. Conforme ilustrado na Figura 1, a compreensão dessas interações é fundamental para o desenvolvimento e a otimização de materiais destinados a aplicações industriais.

Entre os equipamentos disponíveis para essa finalidade, o simulador termomecânico Gleeble 563 destaca-se pela capacidade de reproduzir ciclos térmicos e mecânicos sob condições controladas, permitindo avaliar fenômenos metalúrgicos associados à soldagem, aos tratamentos térmicos e aos processos de conformação. As principais características

operacionais do equipamento, apresentadas na Tabela 1, evidenciam sua versatilidade para aplicações de pesquisa e desenvolvimento.

No caso do aço SAE 8620, os parâmetros de processamento apresentados na Tabela 2 influenciam diretamente as transformações de fase discutidas ao longo do trabalho. A metodologia representada na Figura 2 demonstra a possibilidade de estabelecer correlações consistentes entre as condições de processamento, a evolução microestrutural e as propriedades mecânicas obtidas após os tratamentos térmicos (AGREDO-DIAZ et al., 2021).

A aplicação do Gleeble 563 permite reproduzir, sob condições controladas, ciclos térmicos representativos de processos industriais, favorecendo a compreensão das transformações microestruturais e de sua influência sobre as propriedades mecânicas dos aços de engenharia.

Como perspectiva futura, recomenda-se a ampliação dos estudos envolvendo diferentes condições de aquecimento e resfriamento, associadas a técnicas avançadas de caracterização microestrutural, com o objetivo de aprofundar a compreensão dos mecanismos que governam o desempenho dos materiais submetidos a ciclos termomecânicos.

REFERÊNCIAS

AGREDO-DIAZ, D. G.; ANGARITA-MONCALEANO, I.; RODRÍGUEZ-BARACALDO, R. Production and characterization of dual-phase steels from an AISI 8620 steel with high Mn content. **DYNA**, Medellín, v. 88, n. 217, p. 42-49, 2021. DOI: 10.15446/dyna.v88n217.90451. Disponível em: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/90451>. Acesso em: 10 jun. 2026.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Heat Treating**. v. 4. Materials Park: ASM International, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E18**: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E384**: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken: ASTM International.

BORBA, Tadeu Messias Donizete. **Avaliação do efeito de diferentes aportes de calor na microestrutura e tenacidade da região de grãos grosseiros da zona afetada pelo calor de aço TMCP**. 2019. 256 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/30341>. Acesso em: 10 jun. 2026.

BORBA, T. M. D.; MODENESI, P. J. Influência do ciclo térmico de soldagem no

crescimento de grão, nas transformações microestruturais e na formação de MA na GGZAC de aço TMCP. **Soldagem & Inspeção**, v. 24, e2406, 2019. DOI: 10.1590/0104-9224/SI24.06. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/sGgmZWhqJMDbYhgPshhBdCy/?lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2026.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHANDLER, H. **Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels**. 2. ed. Materials Park: ASM International, 1995.

DODDAPANENI, S.; KUMAR, S.; SHARMA, S.; SHANKAR, G.; SHETTAR, M.; KUMAR, N.; AROOR, G.; AHMAD, S. Advancements in EBSD techniques: a comprehensive review on characterization of composites and metals, sample preparation, and operational parameters. **Journal of Composites Science**, Basel, v. 9, n. 3, art. 132, 2025. DOI: 10.3390/jcs9030132. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2504-477X/9/3/132>>. Acesso em: 11 jun. 2026.

DYNAMIC SYSTEMS INC. **Gleeble Systems Technical Specifications and Applications**. Poestenkill, 2024.

FIELD, D. P.; SUWAS, S.; WRIGHT, S. I. Basics of SEM-based techniques for electron backscatter diffraction. In: SUWAS, S.; FIELD, D. P. (org.). **Advances in texture, microtexture, and allied techniques**. Singapore: Springer, 2025. (Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials). DOI: 10.1007/978-981-96-5346-1_2. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-96-5346-1_2. Acesso em: 11 jun. 2026.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TASAN, C. C.; DIEHL, M.; YAN, D.; BECHTOLD, M.; ROTERS, F.; SCHEMMANN, L.; ZHENG, C.; PERANIO, N.; PONGE, D.; KOYAMA, M.; TSUZAKI, K.; RAABE, D. An overview of dual-phase steels: advances in microstructure-oriented processing and micromechanically guided design. **Annual Review of Materials Research**, Palo Alto, v. 45, p. 391-431, 2015. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070214-021103. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-matsci-070214-021103>. Acesso em: 10 jun. 2026.

WILKINSON, A. J.; HIRSCH, P. B. Electron diffraction based techniques in scanning electron microscopy of bulk materials. **Micron**, Oxford, v. 28, n. 4, p. 279-308, 1997. ISSN 0968-4328. DOI: 10.1016/S0968-4328(97)00032-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968432897000322>>. Acesso em: 10 jun. 2026.