

# INTEGRAÇÃO ENTRE CONTROLE DE PROCESSOS E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS NA INDÚSTRIA DE TRANSFORMAÇÃO MECÂNICA

## INTEGRATION BETWEEN PROCESS CONTROL AND CHARACTERIZATION OF METALLIC MATERIALS IN THE METAL FORMING INDUSTRY

Erlifas Moreira Rocha<sup>1, i</sup>  
Luciene Cristina Chiari Déo<sup>2, ii</sup>

### RESUMO

Este estudo investiga, de forma exploratória, a integração entre o controle de processos e a caracterização de materiais metálicos na indústria metalmeccânica. Considerando a crescente demanda por rastreabilidade e confiabilidade na produção, busca-se compreender como técnicas laboratoriais podem contribuir para a melhoria da gestão da qualidade e para a prevenção de falhas ao longo da cadeia produtiva. Com base em um estudo de caso real, apoiado por literatura técnica e científica, foram identificadas falhas recorrentes em processos industriais, bem como as ações corretivas mais eficazes associadas a análises laboratoriais. Técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV-EBSD) e difração de raios X (DRX) são avaliadas quanto à sua aplicabilidade na identificação de fases, caracterização microestrutural e detecção de defeitos internos. Os resultados evidenciam o potencial dessas técnicas de caracterização para reforçar pontos críticos de controle de processo, favorecendo maior previsibilidade, segurança e conformidade com normas técnicas. Além disso, o estudo contribui para a formação acadêmica ao aproximar o ambiente laboratorial das demandas industriais, promovendo uma visão prática e aplicada sobre o uso de ferramentas analíticas no contexto produtivo.

**Palavras-chave:** Controle de processos; Caracterização de materiais; Indústria metalmeccânica; Análises laboratoriais.

### ABSTRACT

This exploratory study investigates the integration between process control and the characterization of metallic materials in the metal-mechanical industry. Considering the growing demand for traceability and reliability in production, the research aims to understand how laboratory techniques can contribute to improving quality management and preventing failures throughout the production chain. Based on a real case study supported by technical and scientific literature, recurrent failures in industrial processes were identified, along with the most effective corrective actions associated with laboratory analyses. Techniques such as scanning electron microscopy (SEM-EBSD) and X-ray diffraction (XRD) are evaluated for their applicability in phase identification, microstructural characterization, and internal defect detection. The findings highlight the potential of these characterization techniques to strengthen critical process control points, enabling greater predictability, safety, and compliance with technical standards. Furthermore, the study contributes to academic training by bridging the gap between the laboratory environment and industrial

<sup>1</sup> Aluno do Curso Superior de Tecnologia Mecatrônica Industrial na Faculdade SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: erlifas.m.rocha@gmail.com

<sup>2</sup> Docente na Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: luciene.deo@sp.senai.br

demands, fostering a practical and applied perspective on the use of analytical tools in the production context.

**Keywords:** Process control; Materials characterization; Metal-mechanical industry; Laboratory analyses.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por rastreabilidade, confiabilidade e conformidade normativa na indústria metalmecânica exige sistemas de controle de processos eficientes e métodos de caracterização de materiais capazes de fornecer informações precisas sobre as propriedades e a integridade dos metais. Monitorar as etapas intermediárias da fabricação, identificando pontos críticos e compreendendo detalhadamente a microestrutura e os defeitos internos, é essencial para garantir a qualidade final dos componentes e prevenir falhas ao longo da cadeia produtiva.

Nesse contexto, técnicas laboratoriais avançadas, como a microscopia eletrônica de varredura associada à difração de elétrons retroespalhados (MEV-EBSD) e a difração de raios X (DRX), têm se mostrado ferramentas eficazes para a identificação de fases, a caracterização microestrutural e a detecção de defeitos internos. Entretanto, sua aplicação como suporte direto ao controle de processos ainda é pouco explorada, o que representa uma oportunidade para aprimorar a gestão da qualidade e aumentar a previsibilidade e a segurança da produção.

Este estudo, de caráter exploratório e fundamentado em literatura técnica e científica, propõe integrar práticas de controle de processos e métodos de caracterização de materiais.

### 1.1 Problema de pesquisa

Na indústria metalmecânica, falhas recorrentes comprometem a qualidade e a conformidade dos produtos. A falta de integração entre o controle de processos e o uso de técnicas avançadas de caracterização, como MEV-EBSD e DRX, reduz a capacidade de detecção precoce de defeitos e limita a eficácia das ações corretivas, afetando a rastreabilidade e a confiabilidade da produção.

### 1.2 Objetivo

Investigar como a integração entre o controle de processos e técnicas de caracterização de materiais, como MEV-EBSD e DRX, pode aprimorar a detecção de falhas, reforçar a gestão da qualidade e aumentar a rastreabilidade na indústria metalmecânica.

### 1.3 Justificativa

Como a aplicação prática de técnicas avançadas de caracterização ainda é pouco explorada como suporte direto ao controle de processos industriais, este estudo se justifica por estabelecer uma conexão efetiva entre análises laboratoriais e demandas produtivas, gerando informações aplicáveis à melhoria contínua, reforçando, assim, a prevenção de falhas e o atendimento às normas técnicas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nos últimos anos, a integração entre controle de processo e caracterização microestrutural tem se mostrado essencial para garantir qualidade e confiabilidade na produção industrial de metais. Cook et al. (1986) já destacavam a complexa interação entre processos químicos, térmicos e mecânicos na indústria siderúrgica, requerendo monitoramento em tempo real por sensores e modelos de referência. Estudos recentes reforçam o papel de técnicas como SEM-EBSD e XRD na avaliação da microestrutura e identificação de fases. Köhler et al. (2018) demonstraram que MEV-EBSD é fundamental para detectar anisotropia microestrutural e distribuição de fases durante conformação a frio, desde que acompanhado de preparo metalográfico adequado. Revisões atuais (SOUZA et al, 2020) destacam avanços em HR-EBSD (High-Resolution Electron Backscatter Diffraction), que permite análise detalhada de deformações e tensões internas, e ECCI (Electron Channeling Contrast Imaging), técnica que possibilita a visualização direta de defeitos cristalográficos, além da tomografia por raios X. Essas técnicas, integradas a análises *in situ*, ampliam a compreensão da evolução microestrutural sob condições industriais, possibilitando a identificação precoce de falhas e a melhoria da rastreabilidade por meio do controle estatístico de processo (SPC). Essas práticas são essenciais para cumprir normas rigorosas e assegurar desempenho e segurança na manufatura de peças metálicas.

## 3 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido por meio de pesquisa exploratória com levantamento e análise de dados provenientes de um estudo de caso e auxílio na literatura técnica e científica sobre controle de processos e caracterização de materiais metálicos na indústria metalmeccânica. Foram mapeadas falhas recorrentes em processos produtivos e correlacionadas com ações corretivas baseadas em análises laboratoriais. Técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX) foram avaliadas quanto à aplicabilidade na identificação de fases, caracterização microestrutural e detecção de defeitos.

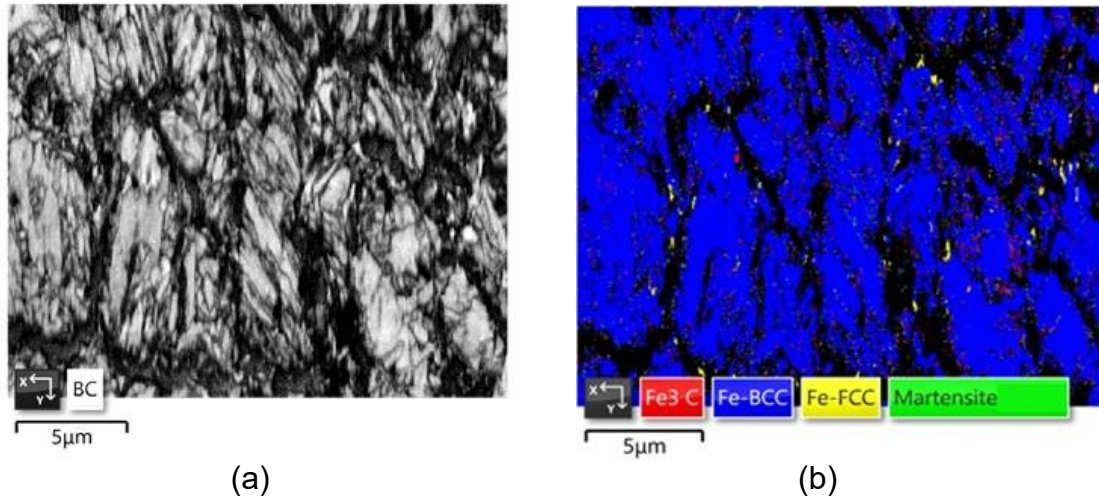
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 (próxima página), são apresentados resultados de MEV obtidos por meio da técnica de EBSD (Electron Backscatter Diffraction) na camada temperada de um componente automotivo, indicando que o material é majoritariamente composto por martensita, com regiões localizadas de distorção cristalina próximas aos contornos de grão. Essas distorções, associadas a tensões residuais internas ou a processos mecânicos prévios, influenciam diretamente a densidade de defeitos e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do aço, ressaltando a importância da caracterização microestrutural para o controle de desempenho no ambiente industrial. O mapeamento de fases também revelou pequenas quantidades de austenita nos contornos de grão, cuja formação pode estar relacionada a tratamentos térmicos anteriores que impediram a obtenção de uma microestrutura totalmente martensítica.

Já a Figura 2 (a seguir) apresenta os padrões de difração de raios X obtidos para o mesmo componente em duas regiões distintas, enquanto os 14 picos característicos relacionam os planos cristalográficos e as fases identificadas, com suas respectivas faixas de ângulos  $2\theta$ . Utilizando radiação de molibdênio, os resultados para o aço analisado exibiram picos característicos de ferrita e baixa

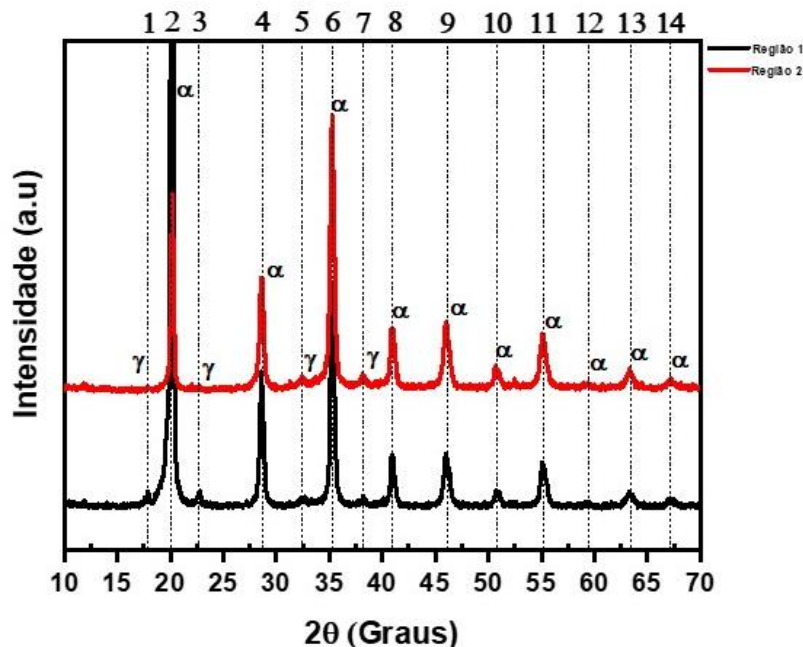
intensidade de picos de austenita, refletindo a microestrutura formada pelo tratamento térmico, especialmente na camada temperada.

Figura 1 – (a) Região de camada temperada de um componente automotivo demonstrando uma microestrutura martensítica refinada e (b) Mapeamento de fases indicando uma matriz martensítica com austenita retida em contorno de grão.



Fonte: próprios autores.

Figura 2 – Difração de raios X em duas regiões da camada temperada do componente automotivo analisado. Martensita ( $\alpha$ ) e austenita ( $\gamma$ ).



Fonte: próprios autores.

A predominância dos picos atribuídos à ferrita ( $\alpha$ ) no DRX corresponde à martensita, pois esta fase metaestável apresenta estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC). Os picos de difração são difusos e se sobrepõem aos da ferrita que apresenta rede cúbica de corpo centrado (CCC). Essa característica, junto às microdeformações e tensões internas presentes na martensita, causa

alargamento e baixa intensidade dos picos, dificultando sua identificação direta pela técnica. A baixa intensidade dos picos de austenita ( $\gamma$ ) indica retenção parcial dessa fase, possivelmente relacionada à cinética de transformação durante o resfriamento, como evidenciado nas regiões de contornos de grão (Figura 1). Dessa forma, os picos tradicionalmente associados à ferrita foram reinterpretados como representativos da martensita.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a combinação de técnicas como MEV-EBSD e DRX é fundamental para a caracterização detalhada de microestruturas no ambiente industrial. Essas análises permitem identificar fases, avaliar distorções cristalinas e compreender os efeitos de tratamentos térmicos sobre o material, fornecendo subsídios técnicos para otimizar processos, garantir a conformidade com especificações e melhorar o desempenho mecânico de componentes críticos, como os utilizados no setor automotivo.

## REFERÊNCIAS

COOK, J.R., FROCK, B.G. (1986). Process Control and Materials Characterization within the Steel Industry. In: McCauley, J.W., Weiss, V. (eds) **Materials Characterization for Systems Performance and Reliability**. Sagamore Army Materials Research Conference Proceedings, vol 26. Springer, Boston, MA. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2119-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2119-4_14). Acesso em: 12 ago. 2025.

KÖHLER, D. et al. Development and application of methods to characterize micro cold formed semi-finished products and components. *MATEC Web of Conferences*, v. 190, p. 15012, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819015012>. Acesso em: 09 ago.2025

SOUZA, R. M. de et al. Material characterization techniques in engineering applications. *Materials Today: Proceedings*, v. 27, p. 3447–3454, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.027. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.337>. Acesso em: 12 ago. 2025.

## SOBRE OS AUTORES

### <sup>i</sup> ERLIFAS MOREIRA ROCHA



Graduando do curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. Atualmente aluno de iniciação científica na área de caracterização de materiais metálicos.

### <sup>ii</sup> LUCIENE CRISTINA CHIARI DÉO



Doutora (2009) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Atua como docente na Faculdade SENAI Antonio Adolpho Lobbe nas em áreas relacionadas à Tecnologia dos Materiais e Gestão.