

ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM AÇOS POR RUÍDO BARKHAUSEN COM APRENDIZADO DE MÁQUINA

¹Davi Pereira Garcia, davi.garcia@ifes.edu.br

²Marcelo Camargo Severo de Macedo, marcelo.macedo@ufes.br

¹Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)

²Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Resumo. Este trabalho apresenta uma proposta de aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para estimativa de tensões residuais em materiais metálicos a partir de dados obtidos por meio de ensaio não destrutivo baseado no ruído magnético de Barkhausen. Tensões residuais surgem em diferentes processos industriais e podem comprometer a integridade estrutural de componentes. Por isso, sua identificação de forma prática e não destrutiva é fundamental para aumentar a confiabilidade e segurança em sistemas mecânicos. A metodologia adotada é de caráter exploratório e descritivo, com abordagem quantitativa. A primeira etapa do trabalho envolve a organização de um banco de dados experimental contendo características extraídas dos sinais Barkhausen e variáveis relacionadas aos processos que originaram as tensões. Em seguida, os dados são pré-processados por meio de normalização e limpeza. Para análise, são utilizados algoritmos de aprendizado de máquina supervisionado, como Random Forest, Support Vector Machines (SVM), XGBoost e Redes Neurais, com a finalidade de criar modelos preditivos capazes de estimar os níveis de tensão com base nos sinais medidos. A validação dos modelos é realizada com divisão dos dados em conjuntos de treino e teste e uso de métricas como erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2). Espera-se como resultado a construção de um modelo preciso, com potencial de aplicação prática em ambientes industriais. O estudo está em fase inicial, mas representa um avanço na integração entre técnicas de ensaio não destrutivo e inteligência artificial no contexto da engenharia mecânica.

Palavras-chave: Tensões residuais. Aprendizado de máquina. Ruído Barkhausen. Ensaio não destrutivo.

1. INTRODUÇÃO

Tensões residuais são aquelas que permanecem em um material mesmo após a remoção das cargas que as geraram. Elas surgem em processos industriais comuns da engenharia mecânica, como usinagem, soldagem, tratamentos térmicos e conformação, e podem afetar negativamente a vida útil e a segurança de componentes metálicos. Por isso, identificar e controlar essas tensões é importante para aumentar a confiabilidade de peças e sistemas.

Segundo Jiang e outros (2021), ainda existem dificuldades práticas na medição direta dessas tensões, principalmente em ambientes industriais. Técnicas de ensaio não destrutivo (NDT) têm sido bastante utilizadas como alternativa, permitindo o monitoramento sem a necessidade de remover material da peça ou interromper seu uso. Uma dessas técnicas é o ruído Barkhausen, que tem se mostrado sensível à presença de tensões e variações microestruturais em materiais ferromagnéticos (JILES, 2000).

Com o avanço de métodos de aprendizado de máquina (ML), novas possibilidades surgem para analisar sinais de NDT e estimar características mecânicas de interesse. Segundo Wenfeng Ding e outros (2016), modelos de ML podem ser treinados com dados experimentais para encontrar padrões e auxiliar na previsão de grandezas difíceis de medir diretamente. O uso conjunto de sinais Barkhausen e aprendizado de máquina já vem sendo explorado por alguns autores, mas ainda há poucos trabalhos que integram essas informações com dados de modelagem térmica ou com um volume maior de medições (SHI; SU; CHEN, 2020).

A fundamentação deste trabalho está baseada em estudos sobre tensões residuais, técnicas de ensaio não destrutivo e aplicação de aprendizado de máquina na engenharia, como os trabalhos de Jiles (2000), Jiang Guo e outros (2021), e Wenfeng Ding e outros (2016). A proposta busca contribuir com soluções acessíveis para problemas comuns na área de materiais e integridade estrutural.

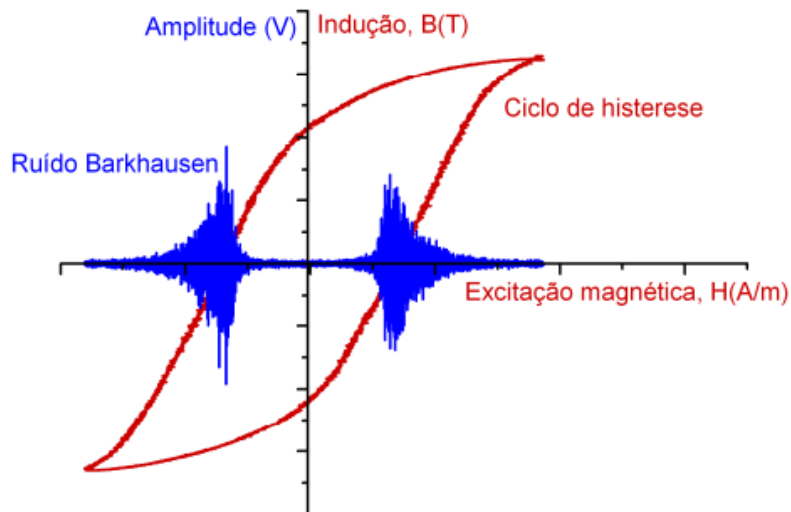
Este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo computacional capaz de estimar tensões residuais a partir de dados obtidos por ensaio não destrutivo utilizando ruído Barkhausen, com apoio de simulações térmicas e aprendizado de máquina. O objetivo geral é desenvolver um modelo preditivo que relacione os sinais medidos com as tensões residuais esperadas. Como objetivos específicos, destacam-se:

- (i) organizar um conjunto de dados com sinais de ruído Barkhausen e variáveis associadas ao processo térmico;
- (ii) realizar simulações para estimar as tensões residuais nos corpos de prova;
- (iii) aplicar algoritmos de aprendizado de máquina para prever os níveis de tensão;
- (iv) analisar o desempenho dos modelos em diferentes condições de entrada.

2. METODOLOGIA

Este trabalho é uma pesquisa exploratória e descritiva, com abordagem quantitativa. O foco está na aplicação de aprendizado de máquina para estimar tensões residuais em materiais metálicos, utilizando sinais obtidos por ensaio não destrutivo com ruído Barkhausen.

Figura 1 – Ruído Barkhausen e curva de histerese associada. Medição SAE 4140

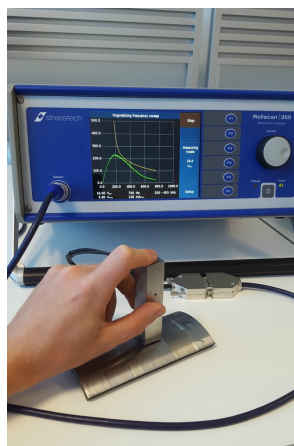


Fonte: Franco Grijalba (2010).

A estrutura da pesquisa foi dividida em etapas sequenciais. Primeiro, será realizado o levantamento e organização de dados experimentais já disponíveis, obtidos em medições anteriores com diferentes condições de processo. Esses dados envolvem características extraídas dos sinais de ruído Barkhausen, como amplitude do pico, largura, posição e parâmetros de forma.

A coleta de dados será feita a partir de registros previamente adquiridos em estudos com materiais ferromagnéticos. As medições foram realizadas no Laboratório LABENDEN - Laboratório de ensaios não-destrutivos no Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento (Cpid) com o instrumento Rollscan 350 da Stresstech específico para leitura de ruído magnético, com dados organizados em planilhas contendo também informações sobre os parâmetros dos processos que geraram as tensões residuais, como tipo de material, tratamento aplicado e condições de resfriamento.

Figura 2 – Equipamento Rollscan 350 da Stresstech utilizado na aquisição de dados.



Fonte: Produção do próprio autor.

A análise dos dados será feita por meio de técnicas de aprendizado de máquina supervisionado. Os dados de entrada (features) serão as variáveis extraídas dos sinais e das condições de processo, enquanto os dados de saída (target) serão os níveis de tensão residual medidos experimentalmente ou determinados por métodos já validados.

Serão testados algoritmos como Random Forest, Support Vector Machines (SVM), XGBoost e Redes Neurais Artificiais, por serem adequados para prever variáveis contínuas com múltiplas entradas. A divisão dos dados será feita entre conjunto de treino e teste, com validação cruzada para garantir a confiabilidade dos resultados.

O desenvolvimento do modelo seguirá os seguintes passos mostrados no fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma Desenvolvimento Modelo



Fonte: Produção do próprio autor.:

- Organização do banco de dados com variáveis de entrada e saída;
- Pré-processamento (normalização e limpeza dos dados);
- Treinamento e ajuste dos modelos;
- Avaliação do desempenho por métricas como erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2).

A implementação será feita em ambiente Python, utilizando bibliotecas como Scikit-Learn, Pandas e NumPy. Tabelas e gráficos serão utilizados para documentar os resultados, de forma que o processo possa ser compreendido e replicado por outros pesquisadores.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Com a aplicação dos algoritmos de aprendizado de máquina aos dados de ruído Barkhausen, espera-se que o modelo desenvolvido consiga estimar os níveis de tensões residuais em materiais metálicos com boa precisão. O objetivo é que, a partir das variáveis extraídas dos sinais e das condições de processo, o modelo consiga identificar padrões e gerar previsões consistentes.

Os resultados esperados incluem:

- A criação de um conjunto de dados organizado, com variáveis de entrada e saída claramente definidas;
- O funcionamento adequado dos algoritmos testados, com valores de desempenho satisfatórios segundo as métricas adotadas;
- A identificação de quais variáveis de entrada têm maior influência nas previsões de tensão residual;
- A possibilidade de utilizar o modelo desenvolvido em outras situações similares, ampliando a aplicabilidade do método.

Com base nas métricas de avaliação, como erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2), será possível comparar o desempenho entre os diferentes algoritmos testados. A expectativa é que, ao final do estudo, o modelo mais eficiente possa ser utilizado como uma alternativa prática para estimativa de tensões residuais em contextos industriais, utilizando apenas sinais de ensaio não destrutivo.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma proposta de aplicação de aprendizado de máquina para estimativa de tensões residuais em materiais metálicos, utilizando dados de ruído Barkhausen como base para o desenvolvimento dos modelos. A ideia central é utilizar técnicas de ensaio não destrutivo associadas a ferramentas computacionais para gerar informações úteis de forma mais rápida e acessível.

A pesquisa está sendo desenvolvida com base em dados experimentais já disponíveis e segue uma abordagem quantitativa, com uso de algoritmos supervisionados. Os resultados esperados envolvem a construção de modelos com bom desempenho, capazes de relacionar os sinais Barkhausen e os parâmetros de processo aos níveis de tensão residual.

A proposta tem potencial de aplicação em diversos contextos da engenharia mecânica, principalmente em situações onde a medição direta das tensões não é viável. Além disso, a integração entre técnicas não destrutivas e inteligência artificial pode abrir caminho para novas soluções voltadas ao monitoramento e controle de processos industriais.

O estudo segue em andamento como parte de um projeto de doutorado e servirá como base para futuros desdobramentos, incluindo análises comparativas, testes com diferentes materiais e ajustes nos modelos aplicados.

3. REFERÊNCIAS

DING, Wenfeng; ZHANG, Liangchi; LI, Zheng; LIU, Yejun. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, 2016. DOI: 10.1007/s00170-016-8998-1.

FRANCO GRIJALBA, Freddy Armando. **Desenvolvimento de Ensaio Não Destrutivo baseado no Ruído Magnético de Barkhausen para caracterização de tensões elásticas e deformações plásticas em aços**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. DOI: 10.11606/T.3.2010.tde-17082010-121508. Acesso em: 2025-11-07.

GUO, Jiang; FU, Haiyang; PAN, Bo; KANG, Renke. Recent progress of residual stress measurement techniques: A review. **Chinese Journal of Aeronautics**, Elsevier, 2021. DOI: 10.1016/j.cja.2019.10.010.

JILES, David. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. **Czechoslovak Journal of Physics**, Springer, 2000. DOI: 10.1023/a:1022846128461.

SHI, Pengpeng; SU, Sanqing CHEN, Zhenmao. Overview of Researches on the Nondestructive Testing for Residual Stress. **Journal of Nondestructive Evaluation**, Springer, 2020. DOI: 10.1007/s10921-020-00688-z.

4. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e ao Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) pelo suporte institucional. Este trabalho faz parte de um projeto de doutorado vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFES. Ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.