

# INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NA ANÁLISE DE DADOS OBTIDOS POR ULTRASSOM AUTOMÁTICO PARA TESTE DE PUREZA EM MATERIAIS DE AÇO LAMINADOS A QUENTE\*

Giovanna Lorena Carneiro Costa<sup>1</sup>

Vinícius Freitas Paixão<sup>2</sup>

Ana Paula Silva<sup>3</sup>

Amarildo Ferreira<sup>4</sup>

## Resumo

Uma maneira de detectar macro inclusões é através de testes ultrassônicos, embora a análise e a interpretação dos resultados dos testes sejam difíceis de entender. Com os resultados da inspeção, temos informações sobre a localização das macro inclusões e, portanto, sua distribuição ao longo do material. No entanto, estabelecer critérios para classificar o material quanto à sua pureza tem sido uma tarefa difícil. O presente trabalho visa estabelecer uma ferramenta de análise de dados a ser utilizada para controle de qualidade de materiais. Os resultados mostram uma viabilidade estatística e metalúrgica de aplicar este modelo analítico para avaliar o nível de pureza dos aços laminados a quente.

**Palavras-chave:** Ensaios não Destrutivos; Análise de Dados; Macro inclusões; Ultrassom.

## INNOVATION IN THE ANALYSIS OF ULTRASONIC CLEANLINESS TEST DATA FOR HOT-ROLLED STEELS

## Abstract

A way to detect macro inclusions is through ultrasonic testing, although the analysis and interpretation of the test results are difficult to understand. With the results of inspection, we have information regarding the location of the macro inclusions and therefore their distribution throughout the material. However, establishing criteria to classify the material as to its purity has been a difficult task. The present paper aims establish a data analysis tool to be used for quality control of materials. The results show a positive feasibility of applying this analytical model to evaluate the level of purity of hot-rolled steels.

**Keywords:** Nondestructive Testing; Data Analysis; Macro Inclusions; Ultrasonic Testing.

<sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica, Estudante de Graduação, IPUC, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais e Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Metalúrgica, Estudante de Graduação, IPUC, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais e Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Metalúrgica e de Minas, Mestre, Professora, IPUC, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais e Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Mecânica, Graduado, Especialista em Ensaios Não Destrutivos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais e Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Analisar a pureza dos aços, em termos de macro inclusões, tem sido um grande desafio na produção de aços limpos. As macro inclusões, embora indesejáveis, são inerentes ao processo e difíceis de detectar quando se trata de produção em larga escala. Sabendo disso, o setor industrial vem aprimorando suas práticas para garantir a qualidade de seus produtos.

Uma maneira de detectar macro inclusões é por meio de ensaios não destrutivos (END). Estas são técnicas de inspeção de grande importância para o controle de qualidade, especialmente no caso de materiais que a aplicação requer um alto nível de segurança. O uso dessas técnicas está presente em diversos setores, com destaque para os setores de energia, petróleo, automotivo, industrial e construção civil. Utilizando testes não destrutivos, além de identificar macro inclusões, também é possível obter informações importantes sobre um determinado material, como descontinuidades, dimensionamento, degradação, propriedades tecnológicas, defeitos e tudo isso sem torná-lo inutilizável. [5]

O desenvolvimento de ferramentas capazes de estabelecer melhores critérios de avaliação de materiais, para macro-inclusões, melhoraria o controle de qualidade e facilitaria a investigação da origem dessas inclusões durante os processos de fabricação do aço.

Na literatura, existem métodos de tratamento de dados para diferentes aplicações, mas não se encontrou nenhum estudo para estabelecer o nível de pureza dos aços através dos dados obtidos pelo equipamento de teste ultrassônico automático e utilizando ferramentas estatísticas. Desta forma, este trabalho tem como objetivo apresentar uma ferramenta estatística, utilizando a linguagem R, para analisar dados sobre a pureza do aço, a fim de medir a qualidade do produto final e validar esta ferramenta para avaliação da pureza dos aços através dos dados obtidos pelo equipamento ultrassônico, para que possa ser utilizado como controle de qualidade de aços laminados a quente. A validação da ferramenta é complementada com a confirmação metalúrgica por meio da análise metalográfica usando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) para identificação da macro inclusão.

## 2 METODOLOGIA

O RStudio é uma interface conveniente que fornece a análise estatística e gráficos para representar os dados e R é o nome da linguagem de programação. Além disso, a maior vantagem de usar o RStudio em uma indústria para análise de dados é do programa ser uma ferramenta de análise de dados de código aberto ou seja, que consiste em vários pacotes para análise avançada de dados. Em segundo lugar, é capaz de criar uma abordagem de análise de dados simples, econômica e eficiente de recursos para testes ultrassônicos.

### 2.1 Adquirindo o banco de dados

O equipamento ultrassônico automático deve ser capaz de armazenar os resultados do teste de limpeza do aço e exportar esses dados em um formato que um software de dados possa ler, neste caso foi possível extrair os dados do equipamento como um arquivo de valores separados por vírgula (.csv). Esse é um formato muito comum para armazenar os dados tabulares e é reconhecido por R além do software de análise de dados comercial como Microsoft Excel ou Minitab.

Estes dados referem-se aos resultados das reflexões ultrassônicas do aço, as discontinuidades presentes nele, para cada pequeno segmento do material testado, suas informações de rastreabilidade, do equipamento ultrassônico de alta frequência. Também se refere ao tratamento matemático desses dados de reflexão ultrassônica que medem o nível de impureza do material testado. Sob essa condição, os dados dos anos anteriores até o último teste realizado foram exportados e lidos no software RStudio.

## 2.2. Histograma dos resultados do teste de impureza

Um histograma da impureza média para cada material testado foi plotado e analisado para verificar como os resultados estavam concentrados e avaliar os dados dispersos. A função usada para traçar este resultado foi o “qplot”, esta função está dentro da biblioteca “ggplot2”.

## 2.3. Filtrando o banco de dados

Depois que a base de dados foi importada, um filtro foi aplicado para considerar apenas os resultados representativos. A Figura 1 e a Figura 2 mostram exemplos de resultados de um gráfico, ao longo do comprimento do material testado. O eixo das abscissas em ambas as parcelas, a resposta ultrassônica e o nível de impurezas, representa o comprimento do material testado. O eixo das ordenadas, no gráfico de resposta ultrassônica, representa a amplitude do sinal, em porcentagem, que foi refletida pelo material testado e no gráfico do nível de impureza representa, em porcentagem, os resultados do tratamento matemático que mede o nível de impureza para cada segmento de o material avaliado.

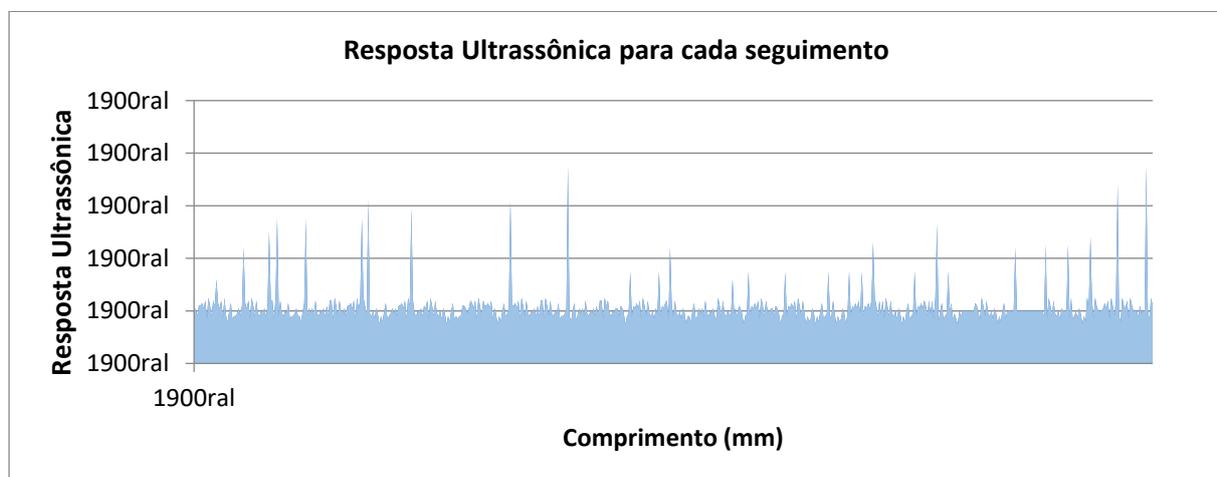


Figura 1 – Teste ultrassônico para cada comprimento do material testado

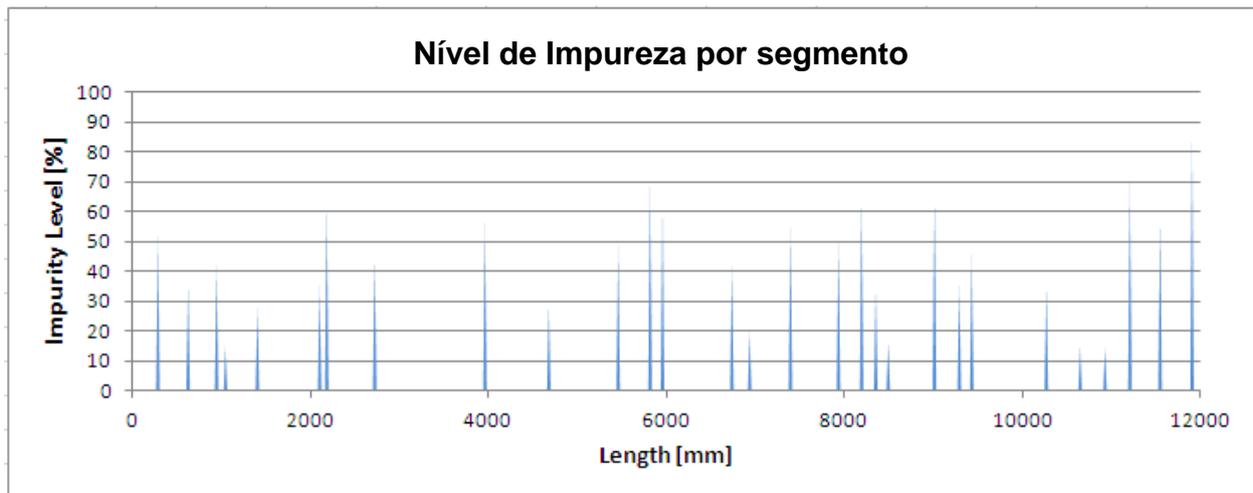


Figura 2 – O gráfico do nível de impureza mostra tratamento matemático que mede o nível de limpeza de cada segmento do material avaliado

Os seguintes critérios foram usados para validar os resultados do banco de dados anterior:

- Foi considerado apenas o primeiro teste para cada material, pois o mesmo pode ser testado várias vezes no mesmo equipamento, evitando duplicação de resultados.
- Foram considerados apenas os resultados que contêm dados para todo o comprimento do material testado. Neste caso, os dados do material testado, com amplitudes médias de cada segmento de 500 milímetros igual a zero, no gráfico de resposta ultrassônica, foram excluídos.
- Foram considerados os dados que estão dentro dos parâmetros de ajuste do equipamento de ultrassom, identificados pelo nível de ruído de no máximo 20%, a partir do gráfico de resposta ultrassônica. Desta forma, os dados em que a amplitude média foi superior a 35% (exemplo na figura 3) e inferior a 10% (exemplo na figura 4) foram excluídos.

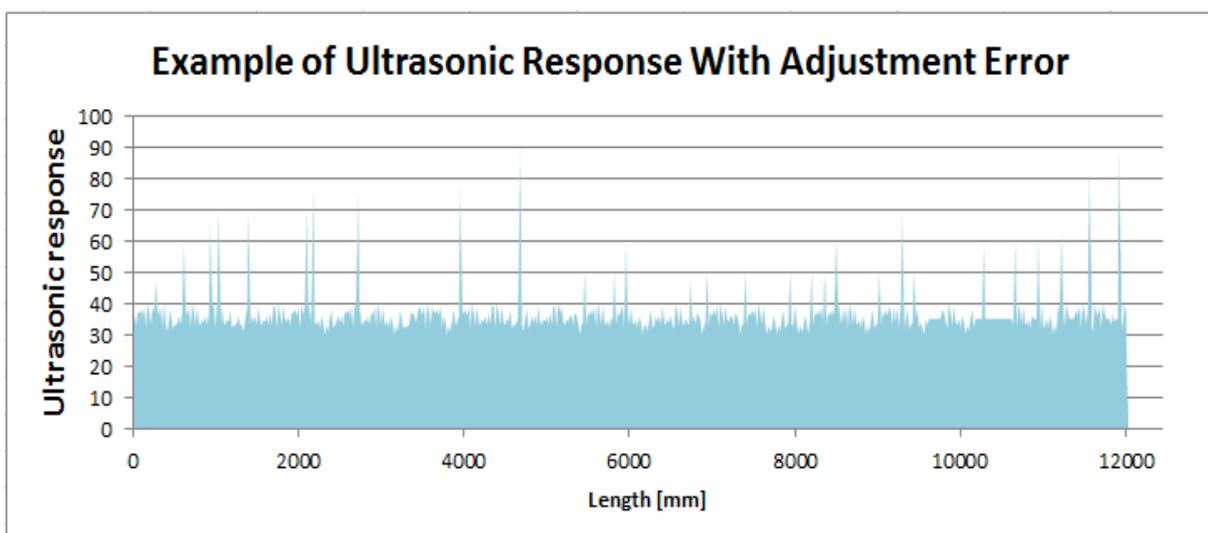


Figura 3 – Gráfico de Resposta Ultrassônica com erro de ajuste maior que 35%.

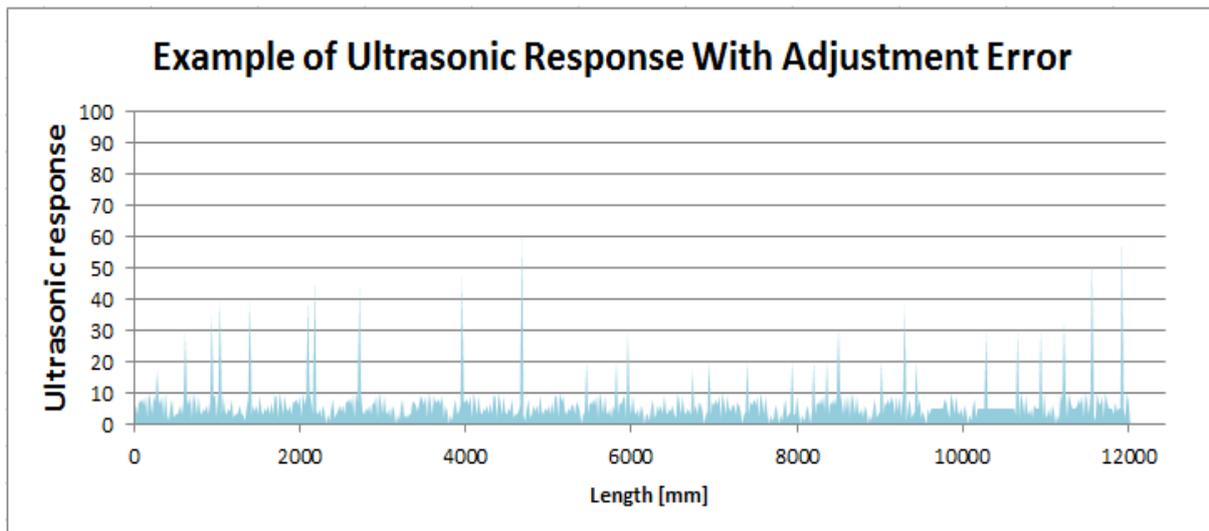


Figura 4 – Gráfico de Resposta Ultrassônica com erro de ajuste menor que 10%

O pacote RStudio usado para filtrar os dados foi “dplyr”, que é uma biblioteca de manipulação de dados, fornecendo um conjunto consistente de comandos para resolver os desafios mais comuns de manipulação de dados. Dentro deste pacote, foi utilizada a função “filter”, que encontra linhas onde as condições são verdadeiras, para definir os critérios anteriores.

#### 2.4. Classificando os dados

Os dados foram classificados considerando o nível de impureza do material e com base no resultado do histograma. Sabe-se que os materiais de aço apresentam macro inclusões, mas a maior parte do material é de aço. Dessa forma, a maior concentração no histograma seria um material limpo, e quanto mais disperso dessa área de concentrado, mais impuro o aço fica. A classificação foi feita a partir do aço limpo, “Rating 1”, para o material mais impuro, “Rating 5”.

#### 2.5. Manipulando os dados

Cada classe de aço foi nomeada considerando sua respectiva aplicação no mercado, usando a função “filter”. Então, todos os grupos similares de aço foram agrupados, uma vez que são considerados padrões similares para os tipos de aço, pois possuem respostas ultrassônicas similares. O grupo 2 possui mais elementos de liga, o que aumentará sua dureza e ao mesmo tempo reduzirá sua soldabilidade em relação ao grupo 1.

Posteriormente, todos os dados foram resumidos por grupo de aço, mês, ano (considerado para o presente estudo apenas o ano 2018) e ranking, usando a função “sqldf”. Além disso, foi realizada uma manipulação estatisticamente os dados para obter a distribuição dos resultados.

#### 2.6. Confirmação Metalúrgica

Esta etapa da caracterização da amostra do material composto de aço laminado a quente, foi realizada através da análise de micro-regiões por espectrometria por dispersão de energia (EDS) no microscópio eletrônico de varredura (MEV) do

Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, no Departamento de Engenharia Metalúrgica da PUC-Minas. O laboratório do departamento de engenharia metalúrgica utiliza o modelo Jeol JSM-IT300, com a resolução de 4,0 mm e 0,6mA.

As amostras foram observadas em diferentes aumentos, até encontradas regiões com a presença de inclusões. Em função da composição do aço estudado, selecionaremos os seguintes elementos químicos para análise por EDS: O, Mg, Al, Si, S, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe e Ni. Assim, através da intensidade relativa dos picos dos elementos químicos presentes, foi possível determinar qualitativamente a composição da inclusão analisada.

### 3 DESENVOLVIMENTO

A base de dados contém informações sobre os resultados do teste ultrassônico, sendo a resposta ultrassônica e o nível de impurezas para cada segmento de cada material testado, informações referentes a corrida, número de identificação, grau do aço, número do processo, nível de impurezas e comprimento do material.

O segundo passo foi traçar um histograma do nível médio de impureza para todo o banco de dados. A figura 5 abaixo mostra o gráfico com o resultado:

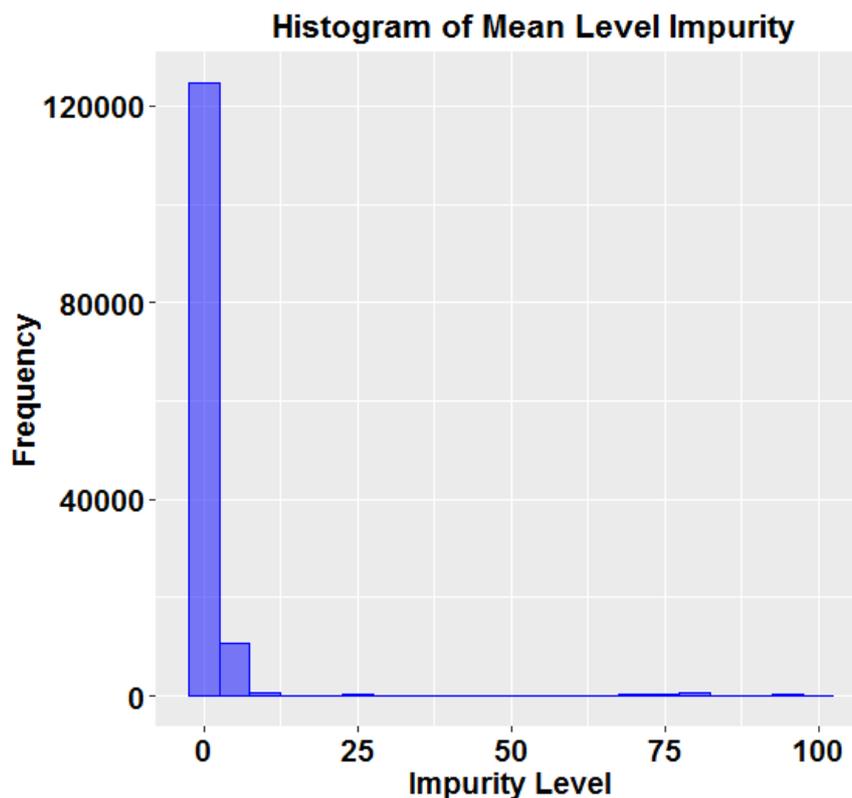


Figura 5 – Histograma do nível médio de impureza

A maioria dos resultados concentrou-se entre 0 e 2% de impureza. Alguns resultados foram entre 2 e 8%, e o restante dos resultados foram superiores a 8%. Além disso, pode-se notar alguns resultados concentrados superiores a 25% e estes foram conferidos individualmente, a fim de verificar a validade dos dados. Após a verificação desses resultados dispersos, notou-se que o nível de impureza superior a 35% eram inválidos, pois esses resultados foram erros de ajuste do equipamento, sugerindo a adição de outro filtro para excluir estes resultados.

Além dos resultados do nível de impureza superior a 35% que foram filtrados, aplicou-se outros filtros. Foram filtros considerando apenas o primeiro teste para cada material testado, apenas resultados que guardam dados para todo o comprimento do material testado, excluindo os resultados com amplitudes médias de cada segmento de 500 milímetros igual a zero, nos dados de resposta ultrassônica e excluindo dados em que a amplitude média é superior a 30%.

Após a filtragem, a base de dados foi reduzida em 25%. Os resultados após a filtragem foram considerados confiáveis para serem manipulados. Com o resultado confiável, baseado nos resultados do histograma, foi sugerido a classificação do resultado médio do teste de impureza configura 6 abaixo:

RATING BASEADO NO NÍVEL DE IMPUREZA	
CLASSIFICAÇÃO	NÍVEL DE IMPUREZA %
Rating 1	$0 < x \leq 2$
Rating 2	$2 < x \leq 4$
Rating 3	$4 < x \leq 6$
Rating 4	$6 < x \leq 8$
Rating 5	$8 < x$

Figura 6 – Classificação para cada nível de impureza em %

Em seguida, todos os dados foram resumidos por grupo de aço, mês, ano, contagem total de resultados e classificação do nível de impureza. Depois de manipular os dados, os resultados foram plotados mensalmente, a fim de verificar o nível de variação de impureza. Os resultados são mostrados abaixo, nas figuras 7 e 8:

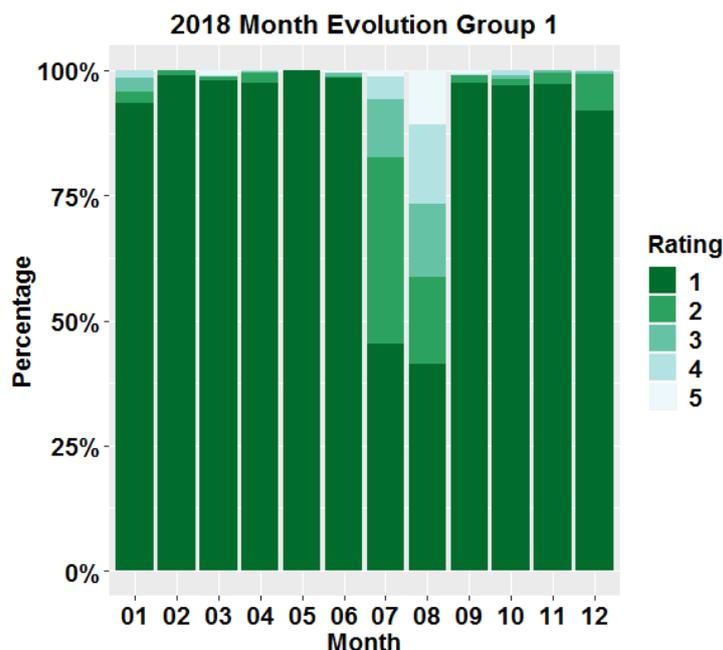


Figura 7 – Evolução Mensal do ano de 2018 para o grupo 1.

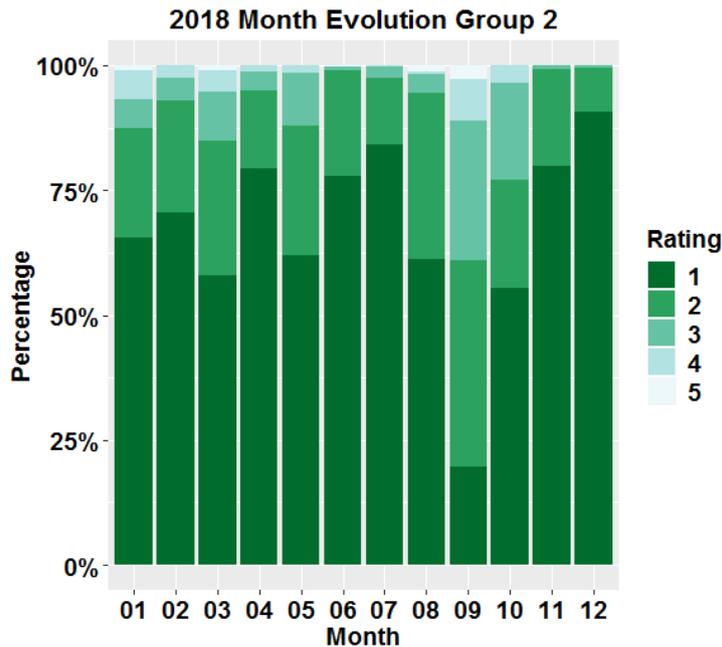


Figura 8 – Evolução Mensal do ano de 2018 para o grupo 2.

No Grupo 1 em 2018, houve uma pequena variação no primeiro semestre e prevalecendo Rating 1. No entanto, em julho e agosto houve uma variação significativa, aumentando para os Ratings 3, 4 e 5, especialmente em agosto, que aumentou ainda mais para o Rating 4 e 5. Assim, as variações desses dois meses indicam que os materiais inspecionados nesse período devem ser investigados e verificados em termos de macro inclusões. Depois de julho e agosto, o nível de impureza variou pouco e o Rating 1 prevaleceu.

O Grupo 2, em 2018, registrou variações durante todo o ano, cujo Rating 2 aumentou, indicando variação pouco expressiva, exceto em setembro e outubro, quando os resultados migraram para os ratings 3, 4 e 5. Isto indica que os materiais inspecionados neste período devem ser investigados e verificados em termos de macro inclusões.

Após a análise de dados, realizou-se a comprovação metalúrgica utilizando o MEV para identificar a presença de macro inclusões nas amostras. Foi segregado o material referente ao mês de setembro de 2018 do grupo 2 que estava no Rating 5, pois neste mês foi detectado a maior variação em relação ao nível macro inclusional. Com a análise microscópica foi possível identificar a presença de macro inclusões no material, conforme as figuras 9 e 10 abaixo:

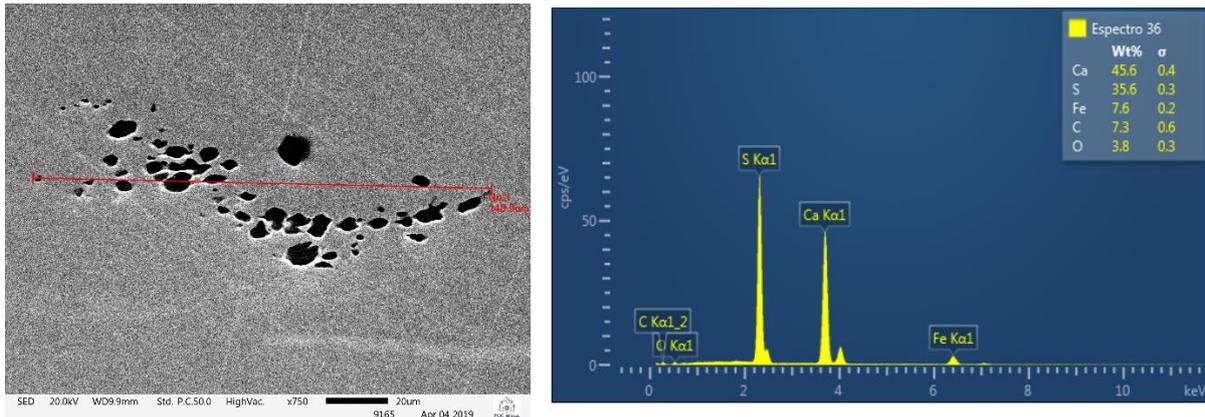


Figura 9: Análise micrográfica indicando a presença de macro inclusões de sulfeto de cálcio com tamanho de 148 µm e com morfologia alongada após a laminação.

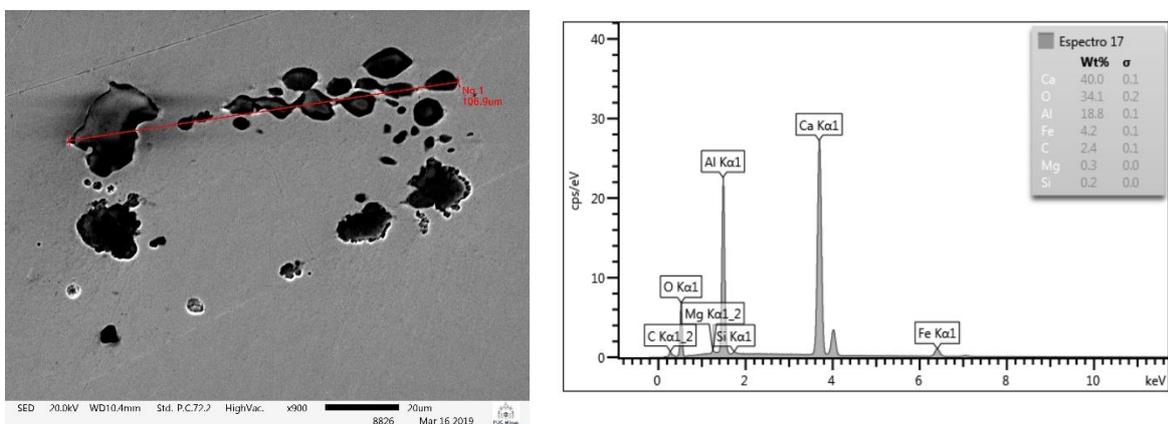


Figura 10: Análise micrográfica indicando a presença de macro inclusões de aluminato de cálcio com tamanho de 106 µm e com morfologia alongada após a laminação.

Através das macro inclusões presentes nas amostras foi possível validar metalurgicamente o uso da ferramenta proposta no artigo na detecção da variação do nível de impureza do material de aço laminado a quente.

#### 4 CONCLUSÃO

Atualmente, produzir aços sem macro inclusões ainda é um desafio para o setor siderúrgico. Os danos causados pela presença de macro inclusões podem variar dependendo da sua aplicação final, e para alguns deles a quantidade, geometria, composição química e distribuição de macro inclusões ao longo do material podem ser prejudiciais.

Utilizando a ferramenta descrita neste trabalho, juntamente com a inspeção automática ultrassônica, foi possível identificar automaticamente a variação de impureza em termos de macro inclusões nos materiais testados. Assim, a análise dos dados usando a ferramenta R permitiu estabelecer um critério para classificação do nível de impureza dos aços laminados a quente.

## REFERÊNCIAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM E45: Standard Test Methods For Determining The Inclusion Content Of Steel. United States, 2005.
2. CRAMB, A.W. The Making, Shaping And Treating Of Steel: Casting. 11. ed. AISE Steel Foundation, 2003.
3. DEKKERS, R. Non-Metallic Inclusions In Liquid Steel, 2002. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2002.
4. GHOSH, A. Secondary Steelmaking: Principles And Applications. Florida: CRC Press, 2001.
5. HELLIER, C. Handbook Of Nondestructive Evaluation. New York: McGraw Hill Professional, 2012.
6. KIESSLING, R.; LANGE, N. Non-Metallic Inclusions In Steel. London: Institute of Metals, 1978.
7. KRAUTKRÄMER, J; KRAUTKRÄMER, H. Ultrasonic Testing Of Materials. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1977
8. SHULL, P. J. Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, And Applications. Florida: CRC Press, 2002.
9. SIMENSEN, C.. The Effect Of Dissolved Elements And Inclusions On The Properties Of Metal Products. In: ENGH, T. Abel. Principles of metal refining. Oxford: Oxford University Press, 1992. p. 1-38
10. SINHA, A; SAHAI, Y. Mathematical Modeling Of Inclusion Transport And Removal In Continuous Casting Tundishes. ISIJ International, v. 33, n. 5, p. 556-566, 1993.
11. TURKDOGAN, E; FRUEHAN, R. in Making, Shap. Treat. Steel Steelmak. Refin. Vol., 11th ed. (The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA, 1999), pp. 37–160
12. ZHANG, L; THOMAS, Brian. Evaluation And Control Of Steel Cleanliness: Review. In: STEELMAKING CONFERENCE, 2002, Beijing. Proceedings... Beijing: ISS, 2002. p. 431-452.