

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DETECÇÃO DE ESCÓRIA DURANTE VAZAMENTO DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO
ATRAVÉS DA ANÁLISE DO SOM

por

Eduardo Nazario Fabris

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Fabris, Eduardo Nazario
DETECÇÃO DE ESCÓRIA DURANTE VAZAMENTO DE UM FORNO
ELÉTRICO A ARCO ATRAVÉS DA ANÁLISE DO SOM / Eduardo
Nazario Fabris. -- 2019.
24 f.
Orientador: Tiago Becker.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Aciaria. 2. Escória. 3. Metal. 4. Análise do
som. I. Becker, Tiago, orient. II. Título.

Eduardo Nazario Fabris

DETECÇÃO DE ESCÓRIA DURANTE VAZAMENTO DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO
ATRAVÉS DA ANÁLISE DO SOM

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Tiago Becker

Comissão de Avaliação:

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, dezembro de 2019

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Teresinha, pela oportunidade de estudar e apoio incondicional.

À meu irmão, Bruno, pelos conselhos.

À minha namorada, Emily, pelo companheirismo.

À meus amigos, pelos momentos de auxílio e descontração.

À equipe da Usina Riograndense: Cleber, Manuela, Tulio, pelo troca de conhecimentos e auxílio.

DETECÇÃO DE ESCÓRIA DURANTE VAZAMENTO DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO ATRAVÉS DA ANÁLISE DO SOM

Nazario Fabris, Eduardo
edudu0102@hotmail.com

Resumo. A importância da identificação e do correto momento de encerrar o vazamento de aço do forno para a panela, em uma siderúrgica, é de extrema relevância para o processo de aciaria. A eficiência na identificação da passagem de escória implica em reduções de custo consideráveis, pois esse subproduto não é desejável nos processos subsequentes. Como operadores mais experientes conseguem identificar a passagem da escória pelo som durante o período de 2 meses, gravaram-se áudios do vazamento de 30 corridas e foram analisadas as características do som durante a passagem de metal e escória do forno para panela com objetivo de identificar se é possível utilizar o som para automatizar o processo. Além disso, foram extraídos gráficos que caracterizam as variações do som, por bandas de frequência, durante a passagem dos dois fenômenos, bem como valores numéricos de seus diferentes níveis. Técnicas de análise estatística (ANOVA), foram utilizadas para auxiliar na identificação das bandas de frequência que possuíam maior diferença entre o som da passagem de metal e da passagem de escória. Identificou-se que nas bandas de um terço de oitava de 800Hz e 3200Hz não houve sobreposição de valores durante a passagem de metal e escória identificando a diferença entre ambos.

Palavras-chave: Aciaria, escória, metal, bandas de frequência, análise estatística.

Abstract. The importance of identification and the correct timing of closing the casting steel from the furnace to a pan in a steel mill is of utmost relevance to the steelmaking process. The efficient identification of slag passage implies considerable cost reductions as this by-product is not desirable in subsequent processes. As more experienced operators can identify a slag pass by sound, for a period of 2 months were recorded audios from 30 steel casting and were analyzed as sound characteristics during a metal and slag-to-pan pass for identification purposes if is possible to use the sound to automate the process. In addition, graphics were extracted that characterize sound changing, by frequency bands, during a passage of two phenomena, as well as numerical values of their different levels. Statistical analysis techniques (ANOVA) were used for auxiliary identification of frequency bands that had the greatest difference between the sound of the metal passage and the slag passage. It was found that in the 800Hz and 3200Hz octave bands there was no overlap of values during a metal and slag passage identifying a difference between them.

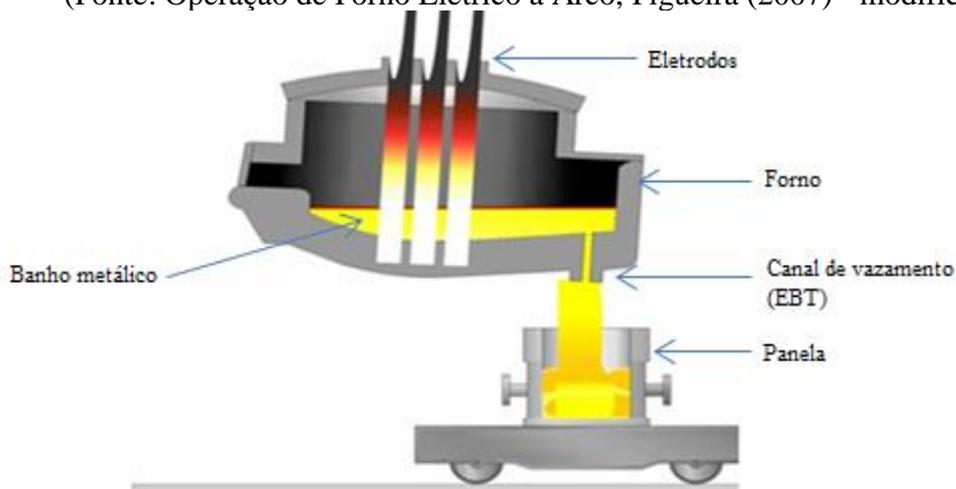
Keywords: Melt shop, slag, metal, frequency bands, statistical analysis.

1. INTRODUÇÃO

Primeiramente, cabe ressaltar que em uma indústria siderúrgica, o aço, no decorrer de seu processo de fabricação, passa por várias etapas. Dentre elas, têm-se o processo de aciaria, cuja responsabilidade é transformar sucata, ligas de ferro, ferro-gusa (produzidos por altos-fornos) em aço. Aliado a isso, em uma parte do processo recorrente no forno elétrico a arco (FEA) ocorre sopro de oxigênio, adições de fundentes como a cal, que provocam reações de oxidação e aumento nas temperaturas, para que se tenha a redução de elementos como carbono (C), silício (Si), enxofre (S), fósforo (P).

O processo de sopro de oxigênio gera reações químicas no interior do forno, provocando a formação de um subproduto insolúvel – escória – que conterá as impurezas do banho metálico. A escória possui além de uma combinação de óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO), também uma menor densidade comparado com o metal. Dessa forma, flutua sobre o banho, separando-se do metal líquido (BRAGANÇA, S. R. 2012). Segundo John (2009), quando se atinge a temperatura ideal do banho, acontecerá o basculamento do forno, conforme Figura 1, para que haja a retirada do aço e se faça o depósito em uma panela. Assim, caracteriza-se o processo de vazamento do forno para panela, para que posteriormente avance para próximas etapas.

Figura 1 - Basculamento do Forno Elétrico a Arco (FEA) para panela.
(Fonte: Operação de Forno Elétrico a Arco, Figueira (2007) - modificado)



O vazamento é feito pela parte inferior do forno através do canal EBT (Eccentric Bottom Tap-hole), de maneira que o metal mais denso esco primeiro. Conforme Chevrant (2013), o canal EBT surgiu para transfigurar o vazamento convencional visando diminuir a passagem de escória.

Por fim, de acordo com John (2009), um dos maiores desafios para a etapa de vazamento é a de não passar escória à panela de aço, pois há aumento de consumo refratário da panela, reversão de fósforo (P) para o banho.

1.1. MOTIVAÇÃO

Na grande maioria das siderúrgicas, a percepção do início da passagem de escória do forno é realizada por operadores de forma empírica. Dessa forma, colaboradores mais experientes são capazes de diferenciar através do som a passagem da escória e do metal, enquanto os novatos possuem semanas de adaptação para que consigam perceber o fenômeno. Assim, quando identificadas as características do som que assinalam o início da passagem da escória elas podem ser utilizadas para aperfeiçoar o processo de vazamento, diminuindo a dependência da experiência do operador e abrindo uma possibilidade de automatização do processo.

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Modelagens físicas do processo de vazamento que buscam distinguir escória e aço conseguem ser vistos em Hammerschmid et al (1984); Sato C. T. (2007); Pimenta et al (1997). Entretanto estudos através de modelagem não levam em conta diversas variáveis de processo, assim tornando, em certo ponto, um método impreciso.

Através de um estudo experimental, Jesus (2017), a partir do uso de uma câmera termográfica posicionada em direção ao vazamento, gerou imagens e aplicou técnicas de processamento digital, cuja finalidade, além de detectar e segmentar a região do jato de aço também identificou e classificou a passagem de escória no fim do processo de vazamento. Durante inúmeros vazamentos, segmentou-se o jato quadro a quadro para conseguir automatizar a detecção do fenômeno. Sendo assim, os resultados obtidos pela proposta do estudo demonstraram grande assertividade para identificação automática da passagem de escória durante o vazamento, chegando a valores de 99,98% de eficiência. Em sua conclusão, o autor supracitado, comenta que o método não foi capaz de antever a passagem de escória.

Vários trabalhos já foram realizados buscando o momento correto da passagem de escória, porém não foi encontrado na literatura disponível, nenhum equipamento que detectasse o fenômeno através das propriedades oriundas do som. Em Li et al. (2007), tem-se valores do tempo de reação média dos operadores até a primeira ação após identificação da escória durante o vazamento. O tempo de reação para sanar a passagem de escória varia entre 3,9 e 4,8 segundos, enquanto reações auxiliadas por um sistema de detecção de escória varia entre 2,3 e 3,3 segundos após a passagem de escória.

Paralelamente, os estudos direcionados à detecção de escória com auxílio de imagens encontram a diferença através das propriedades do som. Segundo Sylvio R. Bistafa (2013), consegue-se extrair o conteúdo de frequências de qualquer forma de onda, aplicando, por exemplo, a Transformada Discreta de Fourier.

Conforme Lanman (2005), utilizando Transformada Discreta de Fourier, elaborou-se um código de programação computacional em Matlab (2000), para avaliar os níveis de pressão sonora de um período de amostras. Sua implementação permitiu que fossem coletadas amostras do som a qualquer taxa de amostragem suportada pelo hardware através da utilização do filtro de ponderação "A". Com isso, tornando-se perceptível ao ser humano os resultados do sistema das variações de frequência das ondas sonoras.

Dentre inúmeros softwares que possuem capacidade de resolução de problemas, como, por exemplo, Scilab, Matlab, GNU Octave, Python, o Matlab proporciona uma geração de interfaces simples para o usuário final, possibilitando criar aplicativos independentes Vesanto, J. et al. (2000).

Enfim, aliado a possibilidade do uso de uma ferramenta computacional de fácil acesso, de amplo portfólio, de elevada confiança e de grande prioridade ao desenvolvimento e melhoria de seus produtos, sempre visando a redução do custo de fabricação, a Aciaria mostra-se com um grande potencial de estudo, pois além de agregar cerca de 30% do custo do produto acabado, é responsável por inúmeros defeitos observados pelo cliente final, frisa Santos et al (2008).

1.3. OBJETIVO PRINCIPAL

Este trabalho tem por objetivo estudar as características do som, na faixa audível, gerado pela passagem de escória durante o vazamento. Contribuir, ainda, para um menor custo de produção e possível automatização do processo, detectando o quanto antes a passagem de escória. Dessa maneira, através da programação com uso do software Matlab (2012), analisar-se-á, através de gravações, o processo inteiro de vazamento, buscando as características do som que permitem aos operadores identificarem o momento inicial de passagem de escória. Dessa forma, será investigada a possibilidade de alteração no nível sonoro global. Caso não seja possível identificar tal mudança, será investigada a variação sonora por bandas de frequência. Se necessário, serão empregadas técnicas de

análise estatística (como a ANOVA), para tentar identificar a diferença entre o som durante a passagem de metal e escória.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Som

O som pode ser definido como uma variação de pressão ambiente detectada pelo sistema auditivo, segundo Bistafa (2013). Assim, todo som é definido por duas variáveis físicas distintas: intensidade e frequência.

Além do mais, uma fonte sonora pode ser qualquer fenômeno com capacidade de causar ondas de pressão no ar, independentemente de ser uma explosão, assvio, instrumentos. De acordo com Beckwith et al. (1993), a onda sonora propaga-se de forma longitudinal, devido a direção de oscilação das partículas ser paralela das ondas de propagação.

2.2 Intensidade e frequência.

A intensidade relaciona-se com a energia transportada pela onda sonora e, por sua vez, é o que permite classificar, conforme a amplitude da onda, se o som é forte ou fraco. Um som com maior amplitude é um som forte, enquanto um som com amplitude pequena é um som fraco. A intensidade de um som é a quantidade de energia que atravessa, por segundo, uma unidade de superfície perpendicular à direção de propagação do som, sua unidade é $[W/m^2]$. Destaca-se, também, que a menor variação de pressão ambiente detectável é da ordem de 2×10^{-5} Pascal, e que sons com frequência menores que 20 Hz (infrassons) e maiores que 20 kHz (ultrassons) não são perceptíveis a seres humanos, frisa Bistafa (2013).

2.3 Faixa audível e curvas de ponderação A e C

O sistema auditivo dos seres humanos é capaz de captar sons entre 20 e 20.000 Hz, tal intervalo é denominado como faixa audível de frequência. Pelo fato de os ouvidos serem mais sensíveis às frequências aproximadamente entre 500 Hz e 6 kHz e menos sensíveis às acima e abaixo disso, utilizam-se filtros de ponderação para permitir que medidores de nível sonoro possam relatar os níveis de ruído e representar o que ouvimos.

Os filtros são ponderadores que modificam o espectro sonoro tornando a resposta muito próxima do sistema auditivo às inúmeras e diferentes frequências de cada som. Com base nas curvas de sensação sonora, os filtros são definidos por normas (ANSI S1.4, 1983 e ISO 226, 2003) e as curvas de ponderações mais utilizadas são a “A” e “C”.

A ponderação “A” é o filtro padrão das frequências audíveis destinados a reproduzir a resposta do ouvido humano ao ruído. Ela cobre a gama de frequências entre 20 Hz e 20 kHz, portanto o valor ponderado A de uma fonte de sonora é uma aproximação à forma como o ouvido humano percebe o som. Por sua vez, a curva de ponderação “C” é o filtro capaz de medir todo o som do ambiente, ou para avaliar a presença de sons de baixas frequências.

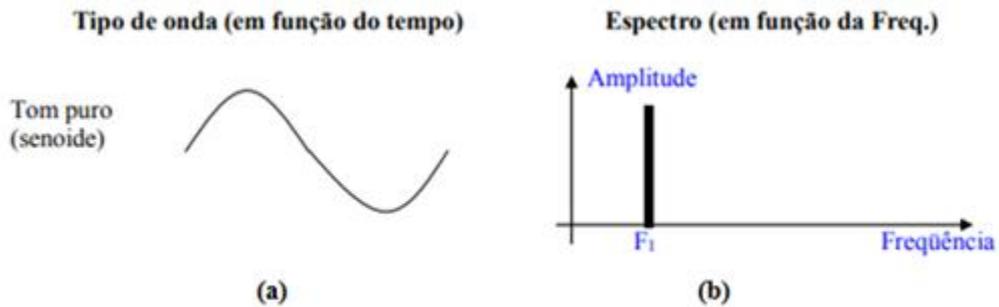
2.4 Formas de onda e análise espectral

O comportamento temporal da pressão sonora pode ser investigado a partir de sua captação durante um intervalo de tempo onde é extraída de um registrador gráfico acoplado em um microfone, assim denominando-se forma de onda. Joseph Fourier demonstrou que dada uma onda analisada, consegue-se decompô-la em uma série de ondas senoidais de diferentes amplitudes. Por sua vez, a análise de Fourier, ou simplesmente análise espectral, visa o estudo da amplitude e da frequência de cada senóide presente no sinal, frisa Ballou (1988).

As formas de onda podem ter diversas formas em função do tempo. Por exemplo, ondas de tom puro, complexas, ruídos. Cada tipo de onda, ao analisar seu espectro, retorna diferentes valores de amplitudes.

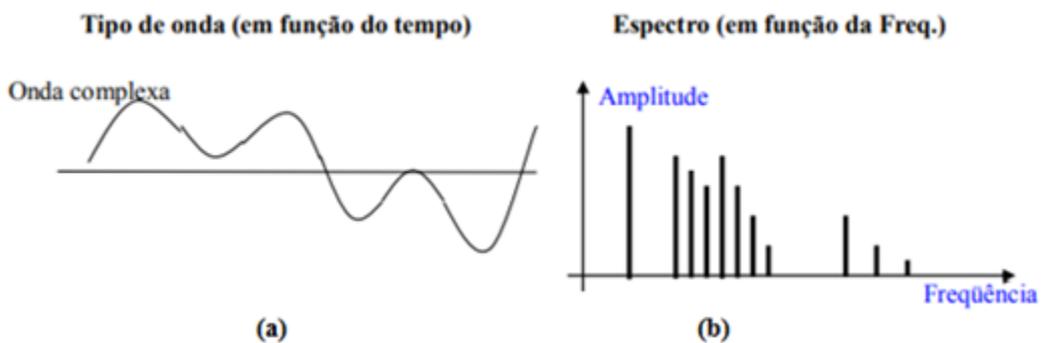
A Figura 2 mostra uma onda em forma de tom puro, com seu respectivo espectro de frequência.

Figura 2 – Forma de onda de um tom puro em função do tempo (a) e seu espectro de frequência (b)



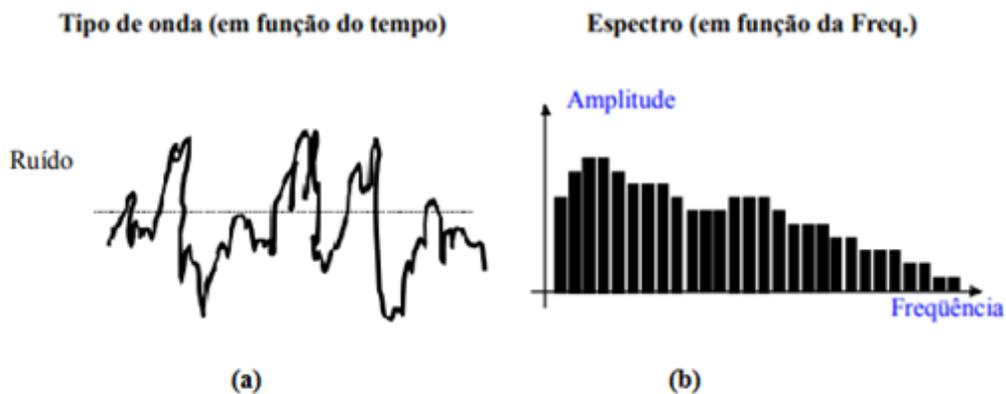
Por sua vez uma onda com formato mais complexo consegue ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Forma de onda de um som complexo em função do tempo (a) e seu espectro de frequências (b)



Um exemplo de ondas sonoras produzidas por ruídos, segue na Figura 4.

Figura 4 – Forma de onda de um ruído em função do tempo (a) e seu espectro de frequências (b)



2.5 Espectros sonoros em bandas de frequência

A largura de banda que será utilizada em uma análise do sinal sonoro depende do objetivo da do estudo. Segundo Bistafa (2013), espectros sonoros de bandas estreitas fornecem com maiores detalhes a distribuição do som em função da frequência, podendo detectar a existência de tons puros, enquanto o espectro de banda larga não consegue revelar, para uma determinada aplicação. Alguns padrões de largura de banda são usualmente utilizados para representação do espectro de frequência, entre as que se destacam são as bandas de oitava e as de terços de oitava. Uma oitava representa o dobro da frequência, enquanto nas bandas de terços de oitava, o intervalo de oitavas é dividido em três bandas proporcionais. Como exemplo, para bandas de uma oitava, onde a frequência central é igual a 500Hz, admitem-se frequências entre 355Hz e 710Hz, enquanto para bandas de terço de oitava com mesma frequência central de 500Hz, o limite inferior é 447Hz e superior 562Hz.

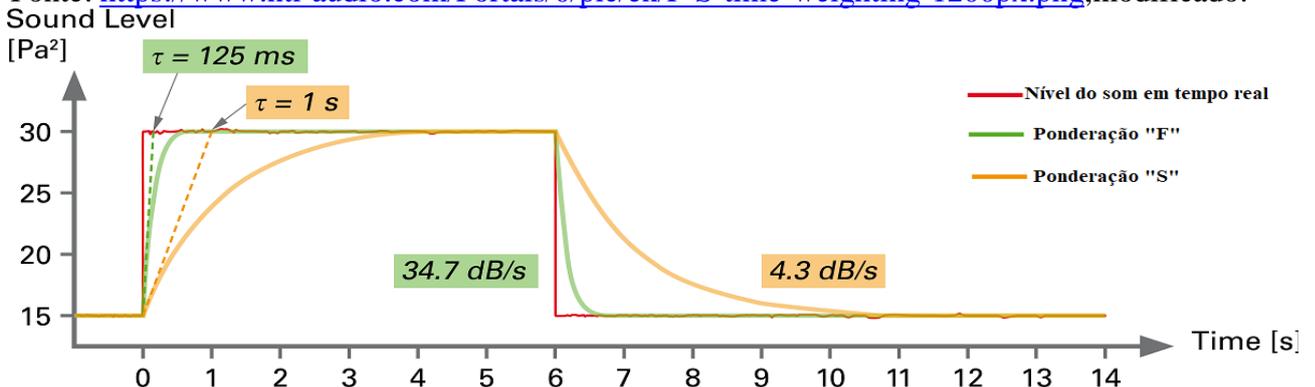
2.6 Ponderações temporais

Todo som gera alterações na pressão do ar e através de sua detecção, os níveis sonoros podem ser medidos. As flutuações dos níveis de pressão sonora (NPS) provocadas por uma palma, música, assovio, por exemplo, são muito velozes o que torna muito difícil a leitura do nível sonoro em tempo real. Para que se possa amortecer as suas bruscas flutuações, os medidores de pressão sonora utilizam um processo de ponderação de tempo.

A norma IEC 61672-1, descreve duas ponderações temporais diferentes, Fast (F) e Slow (S). Essas ponderações possuem uma constante de tempo definida pela norma, sendo que a constante de tempo para ponderação "F" ($t=125\text{ms}$) enquanto para ponderação "S" ($t=1\text{s}$). Por exemplo, se em uma sala silenciosa, um som alto for ligado repentinamente, a indicação do nível ponderado "F" levará aproximadamente 0,8 segundos para atingir o novo nível, enquanto para o nível ponderado "S" o tempo ficará por volta de 5 segundos. O decaimento do nível "F" e do nível "S" também é diferente. Seguindo o exemplo, ao desligar-se o som repentinamente, o nível "S" decairá a uma taxa de 4,3dB/s enquanto o nível "F" decairá a 34,7dB/s. A Figura 5 ilustra o exemplo citado.

Figura 5. Som repentino e comportamento dos níveis rápido "F" e lento "S".

Fonte: <https://www.nti-audio.com/Portals/0/pic/en/F-S-time-weighting-1200px.png>, modificado.



2.7 Filtro Matlab

O filtro de bandas que será utilizado na análise dos sinais gravados e programado no Matlab segue a *Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters* (ANSI Standard S1.11-2004. Melville, NY: Acoustical Society of America, 2004). Contemplando todas frequências de interesse no intervalo padrão da audição humana.

2.8 Boxplot Minitab

O uso do Boxplot serve para analisar a variabilidade, tendência central de distribuições de amostra, procurar por um efeito desproporcional sobre os resultados estatísticos - outliers. Um boxplot, por padrão, demonstra a amplitude, mediana, amplitude interquartil, outliers para cada grupo.

A mediana é um valor que separa a metade menor da metade maior das amostras. Ela é representada pela linha na caixa. A caixa de amplitude interquartílica representa 50% dos dados e os traços, que se estendem de ambos os lados da caixa, representam as amplitudes de 25% dos valores superiores e de 25% dos valores inferiores a ela.

2.9 Análise estatística ANOVA

Análise de variância (ANOVA), testa a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais. As ANOVAs avaliam a importância de um ou mais fatores, comparando as médias de variáveis de resposta nos diferentes níveis de fator. A hipótese nula afirma que todas as médias de população (médias de nível de fator) são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente.

2.10 Respostas da ANOVA

Ao realizar a análise de variância, alguns termos serão levados em consideração no estudo, sendo eles:

- Valor de P: representa uma probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula. Valores de P próximo a zero, ou muito pequenos, fornecem evidências mais fortes contra a hipótese nula. Para determinar se a associação entre a resposta e cada termo no modelo é estatisticamente significativa, compara-se o Valor de P com o seu nível de significância a fim de avaliar a hipótese nula.

- Valor de F: O valor de F é usado para determinar se o termo está associado com a resposta. Valores grandes para F, indicam que o modelo é significativo.

- Nível de significância (α): Geralmente, um nível de significância (denotado como α ou alfa). Um nível de significância de 0,01 indica 1% de risco de se concluir que existe uma associação quando não existe uma associação real, por exemplo.

Portanto, se um teste de hipótese indicar que é improvável que tenha ocorrido a diferença entre uma estatística da amostra e um valor hipotético, conclui-se que a diferença é estatisticamente significativa e, para avaliar a sua significância, Analisa-se o valor de p do teste, sendo ele menor que o nível de significância especificado, pode-se rejeitar hipótese nula do teste. Todavia, se o valor de p for igual ou maior não é possível alegar significância estatística.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a solução do problema proposto neste trabalho. A solução foi desenvolvida utilizando o software Matlab proprietário da MathWork em conjunto com software de análise estatística Minitab. Durante toda a análise estatística foi utilizada confiabilidade de 99%, ou seja, Nível de Significância (α) de 1%.

3.1 Equipamentos

A escolha do sistema para aquisição de dados deste trabalho foi direcionada a garantir a versatilidade, flexibilidade na captação de dados e para que futuros trabalhos possam ser realizados com mesmo intuito. Partindo destas ideias, buscou-se realizar o teste com um aparelho celular e, se fosse detectada a necessidade, partir para um medidor de NPS (nível de pressão sonora). Foi utilizado um Smartphone Samsung Galaxy Note 8, configurado para registrar o som com uma taxa de

amostragem de 48kHz, para captação do áudio de vazamento das corridas e posterior análise das gravações.

3.2 Posicionamento e locais analisados

Foram analisados vazamentos de corridas em dois fornos diferente: Forno 2 (FEA 2) e Forno 3 (FEA 3). Em ambos os fornos, o som que foi gerado pela passagem de metal e escória foi dominante, mas apesar de ambos serem em locais muito parecidos, o FEA 2 situa-se próximo de um vão de entrada da Aciaria, assim podendo ser exposto a ruídos externos. Por sua vez, o FEA 3, situa-se mais distante de locais de acesso favorecendo as gravações. Antevendo a necessidade de padronização das gravações, antes do primeiro acompanhamento, nos dois fornos, foram fixados pontos a 7 metros de distância do vazamento, conforme mostra a Figura 5, aproximadamente a mesma distância, porém não a mesma posição, em que os operadores efetuam a visualização do vazamento.

Figura 5 – Posição para captação de áudio no Forno Elétrico a Arco 3.



Visando menor impacto nos resultados, tomou-se cuidado para que os pontos possuíssem a maior similaridade acústica do local. As gravações foram realizadas sem intervenções durante a operação, e situações, como desligamento do forno, para verificar o som do vazamento sem ruídos de fundo, foram tecnicamente inviáveis.

3.3 Abordagens e medições

Visando uma avaliação ampla dos fenômenos, foram realizadas medições durante a fabricação de diversos tipos de aço, com todos operadores e variáveis de processo que estão diretamente relacionadas a passagem de escória ser mais tardia ou não, como por exemplo, vida e manutenção do canal, metal de alto ou baixo carbono. As medições foram feitas durante 2 meses e cobriram as mais diversas condições de vazamento, porém não foi analisado distintamente o efeito de cada uma das variáveis. Pelo motivo do celular não ter sido calibrado junto a um medidor de NPS, os valores analisados não refletem um valor real e sim um fictício.

Na abordagem proposta, durante as medições, o aluno estava acompanhado do coordenador do processo, analista de melhoria e operadores experientes, os quais auxiliaram na detecção da passagem de escória durante os vazamentos. Toda vez que se vazava uma corrida, iniciava-se a gravação e uma tomada de tempo, para que quando passasse a escória fosse anotado o exato momento. Com o auxílio das pessoas mais experientes, no instante em que se detectava a passagem de escória, fazia-se um

sinal e a tomada de tempo para que, posteriormente, o áudio fosse analisado com maior cuidado no instante anotado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise das medições

Com os registros feitos desde o início do vazamento até o basculamento do forno, alguns ruídos pertencentes ao processo foram desconsiderados. A adição de ligas, enquanto vaza-se a corrida, ocorre quando a panela está com aproximadamente 40% de sua capacidade final, durante as análises, percebeu-se que o final desse ruído não superou 70 segundos, possuindo uma duração de 15 segundos, portanto, esse ruído, que pode ou não possuir características similares a passagem de escória, foi desconsiderada no estudo. O tempo mínimo de um vazamento normal não foi inferior a 90 segundos e a passagem de escória caracterizou-se por uma curta duração (aproximadamente 3 segundos), então foi estipulado uma faixa de estudo. Para que fosse realizado o estudo da passagem de metal e escória a análise foi abordada levando em consideração os 8 segundos que antevem a passagem de escória até o final do fenômeno.

Ressalta-se que durante o acompanhamento do vazamento de 30 corridas, 21 tiveram passagem de escória e fizeram parte do estudo, enquanto as outras 9 corridas não.

4.2 Resolução do problema

Visando a rapidez de resposta para detecção da passagem de escória, buscou-se, primeiramente, uma solução para o problema através da análise dos níveis globais da passagem de metal e escória, para isso foi utilizado um aplicativo com um tempo de integração de aproximadamente 1 segundos caracterizado como de resposta lenta, para que realizassem as comparações entre os fenômenos. Como mostra a Figura 6, por exemplo, percebeu-se que em alguns instantes antes da passagem de escória os NPS fictício foram menores do que alguns instantes durante a passagem, e que durante a gravação, o NPS fictício variou mais dentro de uma condição do que de uma condição para outra, conforme mostra a Figura 7. Por tais motivos e agregado ao fato de o tempo de integração do aplicativo ser de resposta lenta, não se conseguiu detectar, de forma confiável, a viabilidade da solução do problema através dos níveis globais.

Figura 6 – Valores do nível de pressão sonora (fictício) para um tempo de integração de resposta lenta durante o vazamento completo de um aço 1015-C.

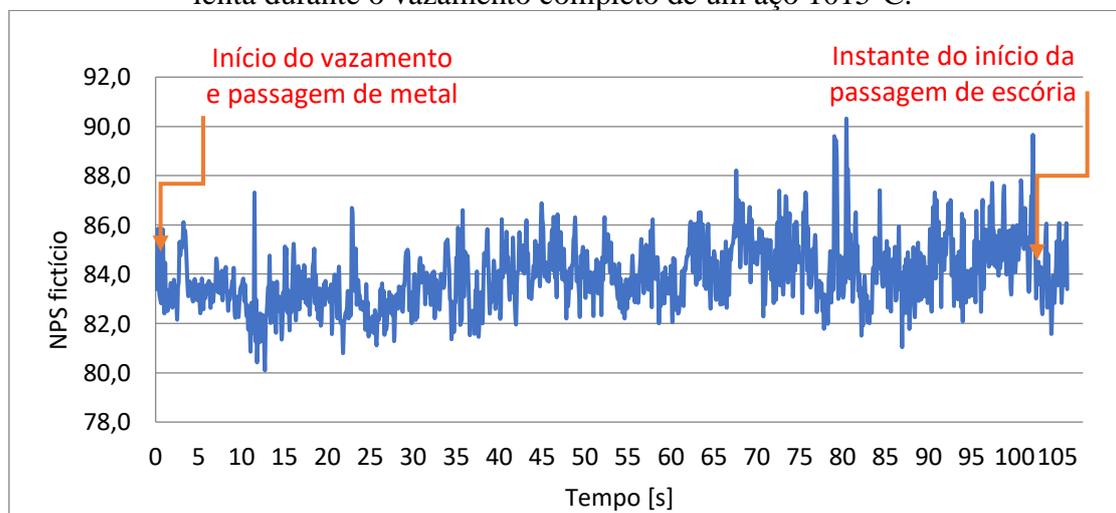
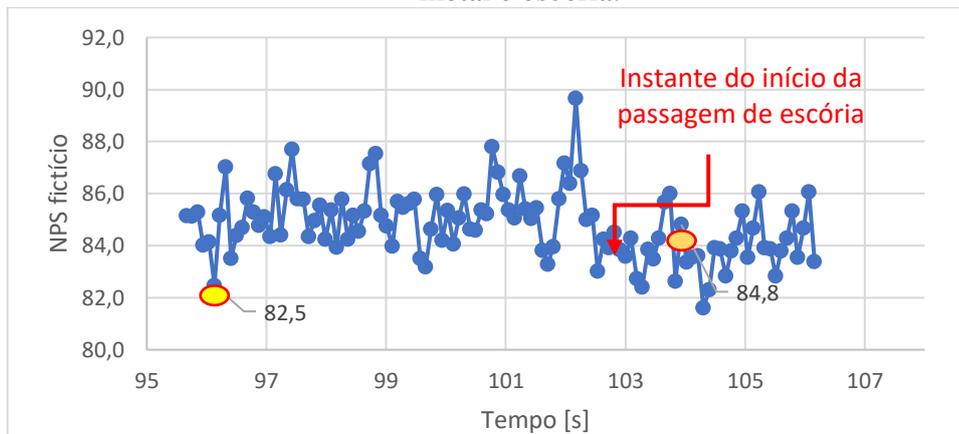
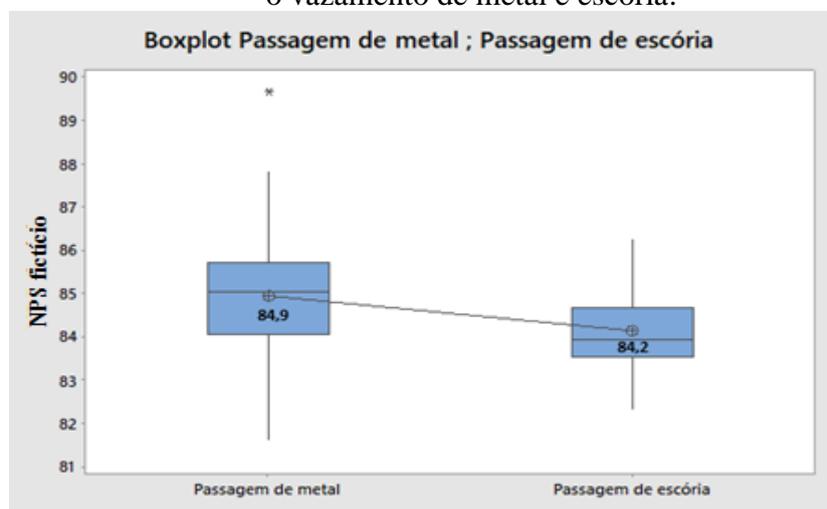


Figura 7 – Intervalo de análise do vazamento completo do Aço 1015-C com instante em que inicia a passagem de escória e valores comparativos do nível sonoro (fictício) entre a passagem de metal e escória.



Foi realizada uma análise estatística de variância, ANOVA, no intervalo de tempo mostrado na Figura 6, obtendo o resultado para Valor de P igual a 0,01, mostrado na Figura A.7, em anexo. Conforme dito no item 2 do trabalho, o Nível de Significância (α) adotado foi de 1%, logo o Valor de P mostra-se maior, ou igual a (α), tão logo concluiu-se que não se pode alegar significância estatística através do parâmetro de comparação dos níveis globais. Na figura 8, observa-se o boxplot de distribuição das amostras e a comparação entre as médias das medições para os tempos de análise da Figura 6, percebeu-se que a média do nível sonoro durante a passagem de escória foi menor que a média durante a passagem do metal.

Figura 8 – Análise da distribuição amostral e comparação entre médias dos valores fictícios durante o vazamento de metal e escória.



Pelo fato de não se conseguir alegar significância na diferença dos níveis globais, analisou-se a evolução, ao longo do tempo, dos níveis de pressão sonora para cada banda de 1/3 de oitava do espectro audível, a fim de ser verificado se, em alguma ou algumas bandas, seria possível identificar uma variação consistente quando a escória começa a passar e, dessa forma, essa(s) banda(s) seria(m) a(s) mais promissora(s) na identificação do início do fenômeno.

De posse das gravações, através dos desenvolvimentos da Rotina A.1, Rotina A.2 e Rotina A.3, que se encontram no anexo, permitiu-se a análise dos dados de acordo com os tempos de interesse, foram analisados 183 instantes em que não houve a passagem de escória e 57 instantes onde houve a passagem. Por meio de programação, com uso do software Matlab (2012), chegaram-se em respostas

gráficas e numéricas, na forma de matrizes, da distribuição do NPS por banda de frequência, que foram importadas para o Excel, possibilitando a análise separada por bandas de frequência com todos tempos analisados durante as 21 medições.

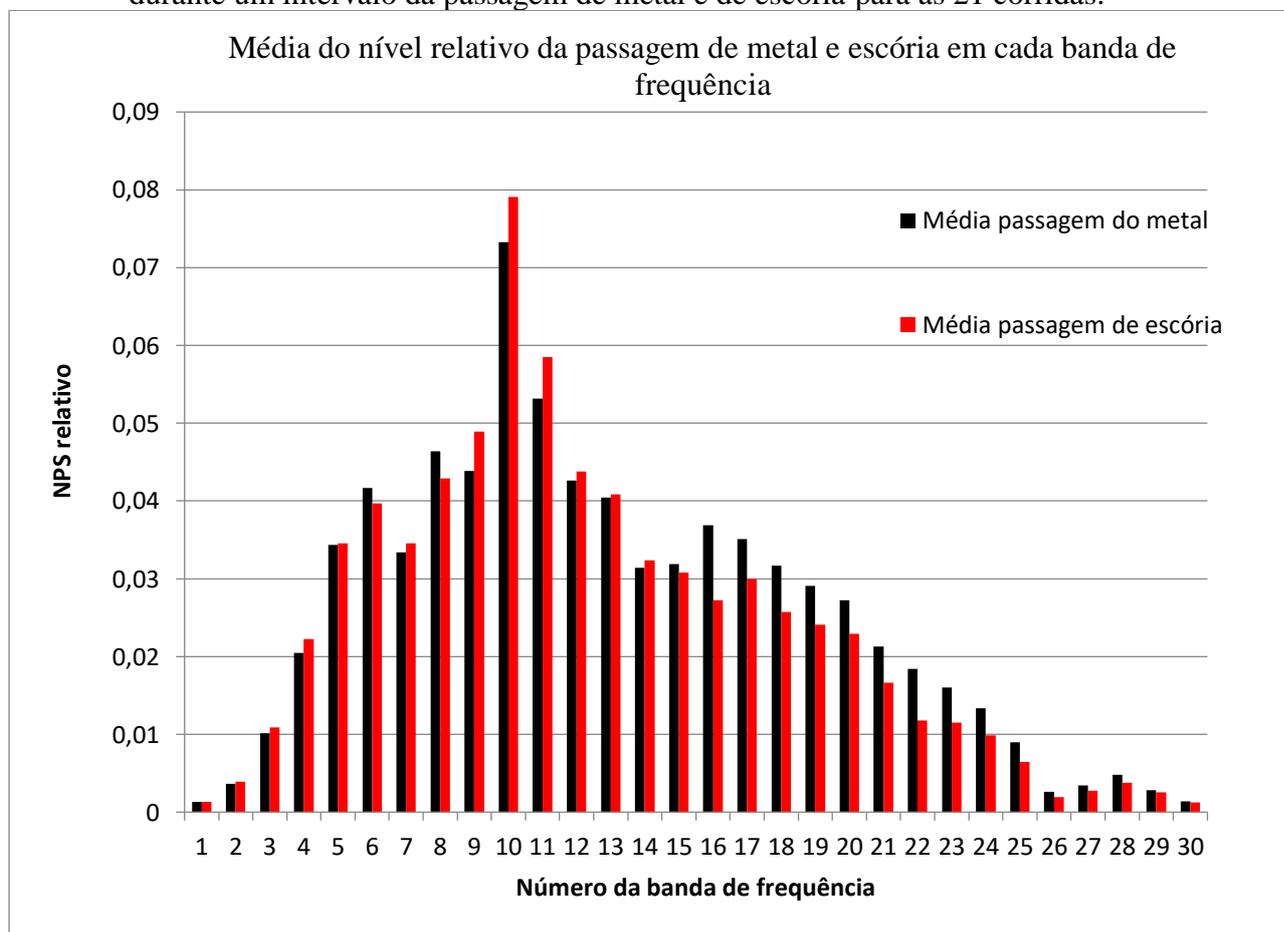
A numeração de cada banda de 1/3 de oitava corresponde aos valores centrais mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Número associado a frequências centrais (Hz) das bandas de 1/3 de oitava.

Bandas de terço de oitava										
Banda de número	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequência (Hz)	25	32	40	50	63	79	100	126	159	200
Banda de número	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Frequência (Hz)	252	318	400	504	636	801	1009	1271	1602	2018
Banda de número	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Frequência (Hz)	2543	3204	4037	5087	6410	8076	10176	12822	16155	20356

Através das médias globais de pressão sonora relativa durante a passagem e não passagem de escória, no intervalo indicado na seção 4.1, analisou-se para cada banda de frequência a existência, ou não, de uma diferença durante a vazamento de metal e escória. Pelo motivo do equipamento não ser um medidor de pressão sonora, e o Matlab utilizar uma escala normalizada pelos valores máximos do arquivo, sua resposta trouxe um nível de pressão sonora relativo em função das bandas de frequência. A Figura 9, mostra que para algumas bandas de frequência o NPS relativo aumentou, para outras caiu e em algumas as alterações foram muito pequenas.

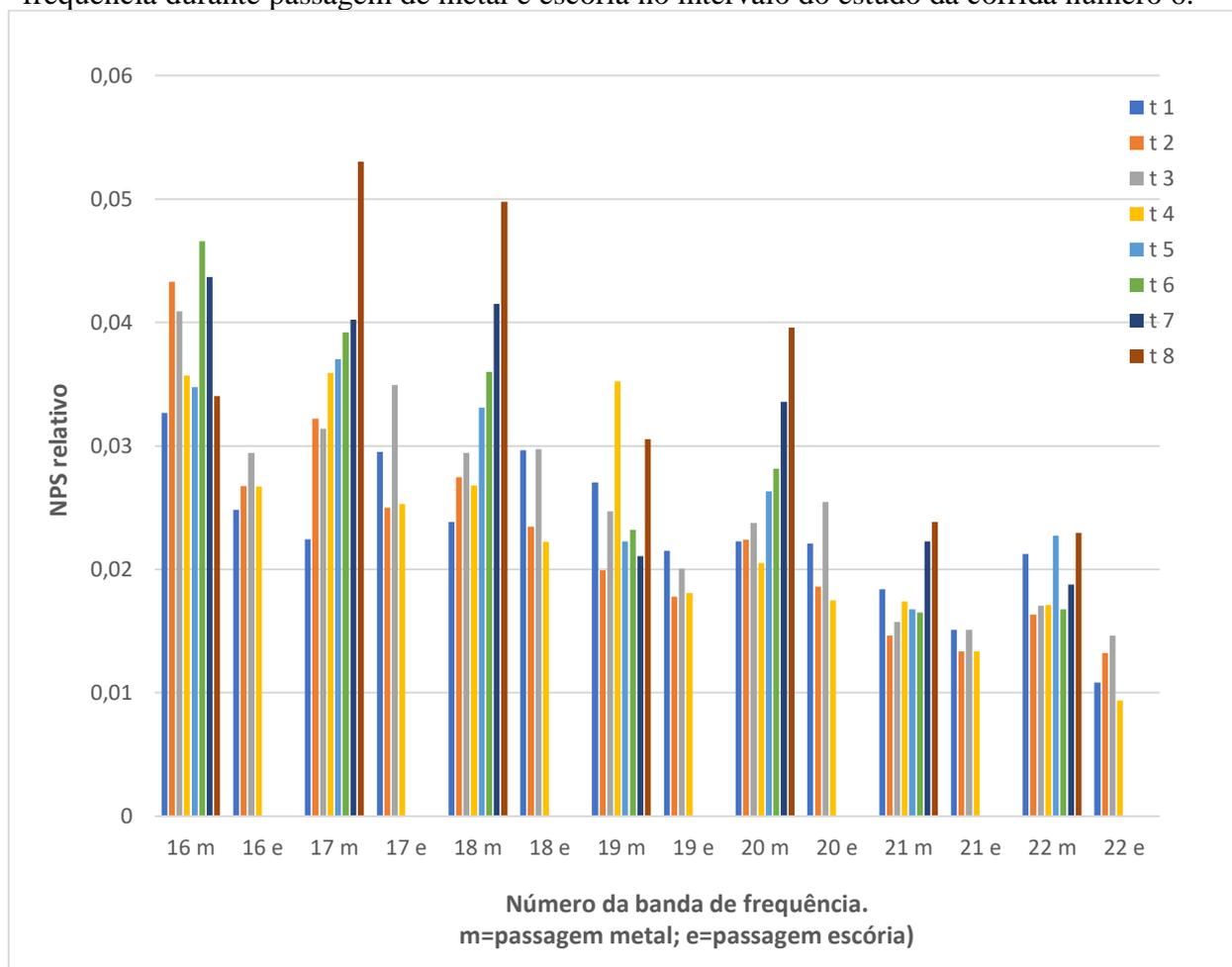
Figura 9 - Gráficos das médias de nível pressão sonora relativo em cada banda de frequência durante um intervalo da passagem de metal e de escória para as 21 corridas.



Para que pudesse verificar a possibilidade de haver diferença sonora entre os fenômenos, foi analisado frequência a frequência, segundo a segundo das 21 gravações de cada vazamento, de forma separada. Conforme será exemplificado, com gravação de número 6, foram realizadas as mesmas abordagens para todas as gravações, sempre buscando por banda(s) de frequências promissora(s) para identificação da passagem de escória. Utilizando a gravação de número 6 como exemplo, durante o intervalo determinado na seção 3.1, analisaram-se as 30 bandas de frequências, durante 8 segundos que antecedem a passagem de escória até o final de sua passagem. A Figura A.10, em anexo, foi gerada e utilizada para comparar os espectros de frequência em cada banda, com o intuito de buscar o máximo de bandas de frequência que possam identificar o início da passagem de escória.

Conforme mostrado na Figura 11, foi percebido que haviam bandas de frequências promissoras para o estudo e encontravam-se na faixa de 800Hz (banda de número 16) e 3200Hz (banda de número 22), essas bandas foram caracterizadas pelo fato de não sobrepor níveis relativos durante a passagem do metal e escória, ou seja, ambos mostraram características diferentes durante cada fenômeno.

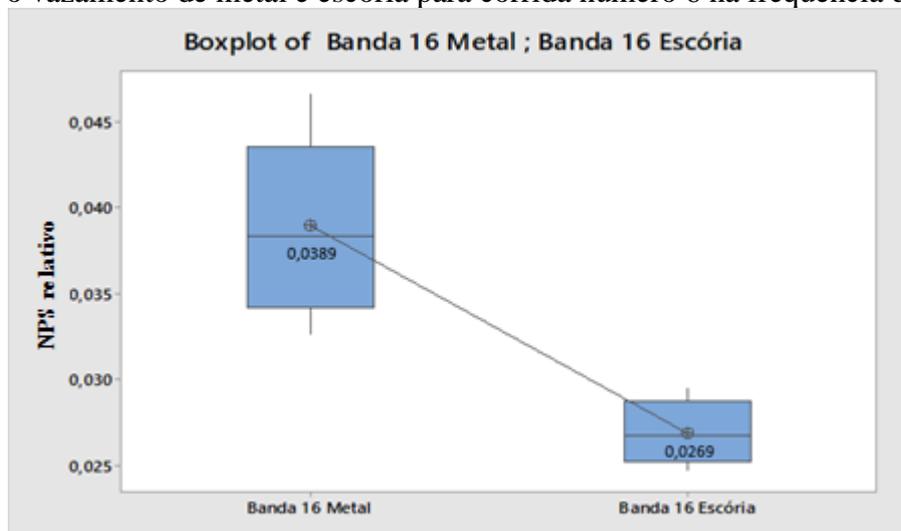
Figura 11 - Gráfico do nível de pressão sonora relativo em função do número da banda de frequência durante passagem de metal e escória no intervalo do estudo da corrida número 6.



Para que fosse comprovado o fenômeno, foi realizada uma análise estatística de variância, ANOVA, nas bandas de número 16 e 22 da gravação de número 6, através da utilização do programa Minitab. As respostas para banda de número 16, por exemplo, obtiveram um Valor de P igual 0,001, portanto concluiu-se que a análise via banda de frequência para valores de 800Hz (banda de número 16) foi estatisticamente significativa. Da mesma forma foi feito para a banda de número 20, onde o Valor de P foi próximo a zero, ou seja, menor que nível de significância (α) adotado: 0,01.

Na Figura 12, mostra-se o boxplot gerado pelo Minitab, que foi utilizado para comprovar estatisticamente a Figura 11. Mostrou-se dessa forma que o espectro de frequência na banda número 16 não possuiu sobreposição de valores durante passagem de metal e escória em nenhum momento.

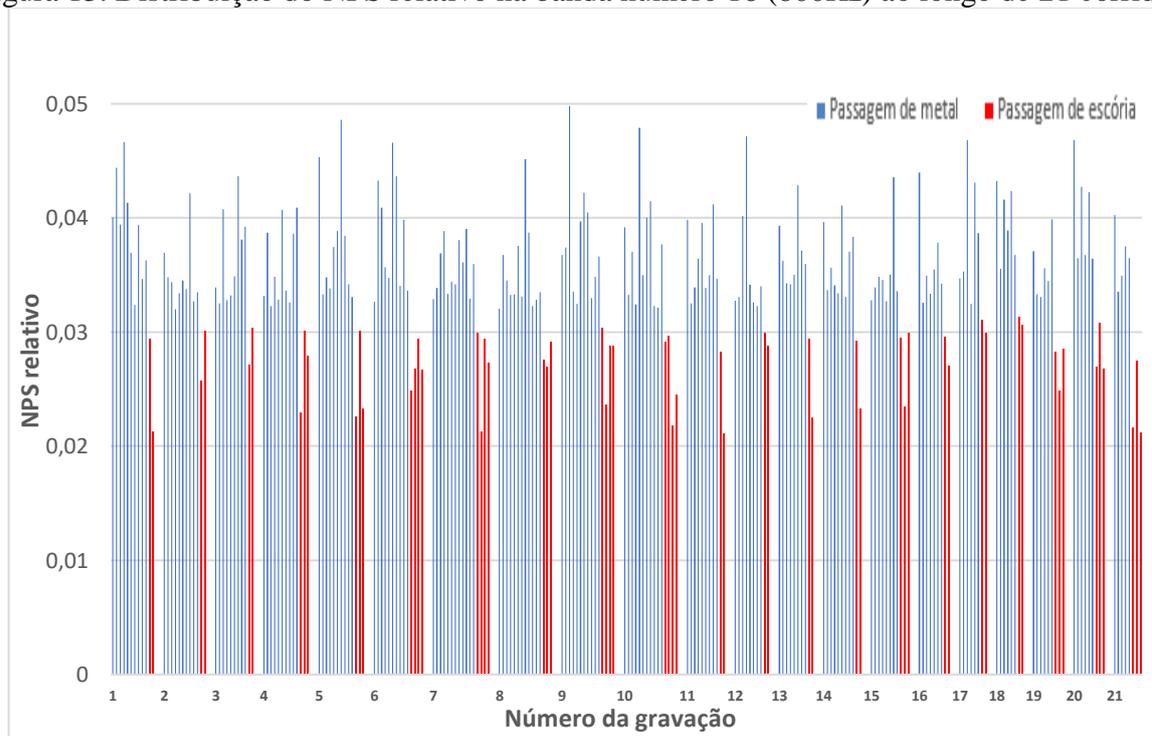
Figura 12 - Análise da distribuição amostral e comparação entre médias dos NPS relativos durante o vazamento de metal e escória para corrida número 6 na frequência de 800Hz.



Durante a análise das 21 corridas, separaram-se os níveis relativos relacionados as frequências que não apresentaram sobreposição de valores. De posse dos dados, geraram-se gráficos, como mostrado pela Figura 13 e Figura 14, onde se pode visualizar o comportamento e a distribuição dos NPS relativos para cada frequência promissora em cada corrida.

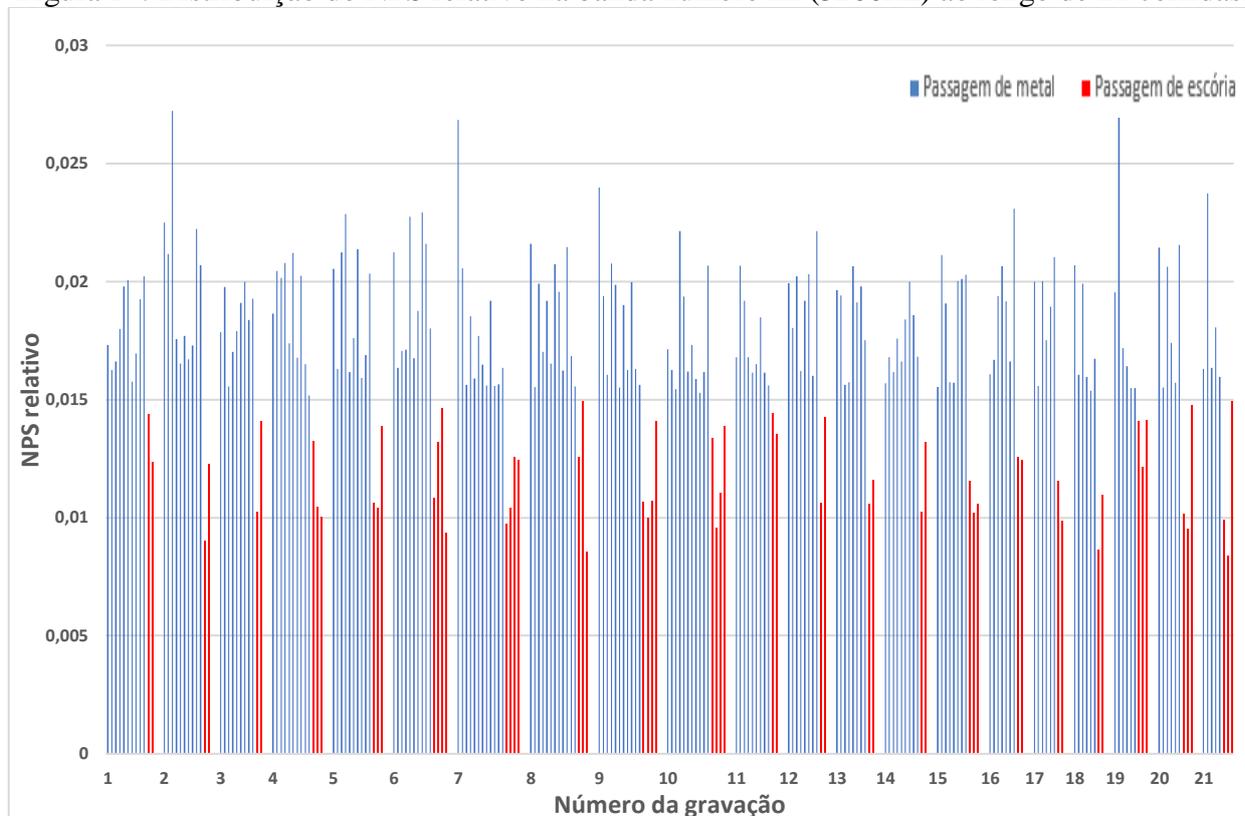
A Figura 13 mostra a distribuição do NPS relativo para a frequência de 800Hz ao longo das 21 corridas.

Figura 13. Distribuição do NPS relativo na banda número 16 (800Hz) ao longo de 21 corridas.



A Figura 14 mostra a distribuição do NPS relativo para a frequência de 3200Hz ao longo das 21 corridas.

Figura 14. Distribuição do NPS relativo na banda número 22 (3200Hz) ao longo de 21 corridas.



Através das Figuras 13 e 14, comprovou-se graficamente a não existência de sobreposição de valores durante a passagem de metal e escória ao longo do período de estudo.

Nas Figuras 15 e 16, provou-se estatisticamente, com nível de significância de 1%, que não houve sobreposição de espectros nas frequências 800Hz e 3200Hz, respectivamente, durante os vazamentos. Em anexo, a Figura A.16 e Figura A.17, mostram o resultado completo da análise de variância para as 21 corridas na banda de número 16 e para banda de número 22, encontrada com o uso do Minitab.

Figura 15 - Análise da distribuição amostral e comparação entre médias dos níveis relativos durante o vazamento de metal e escória para as 21 corridas nas bandas de frequência 800Hz.

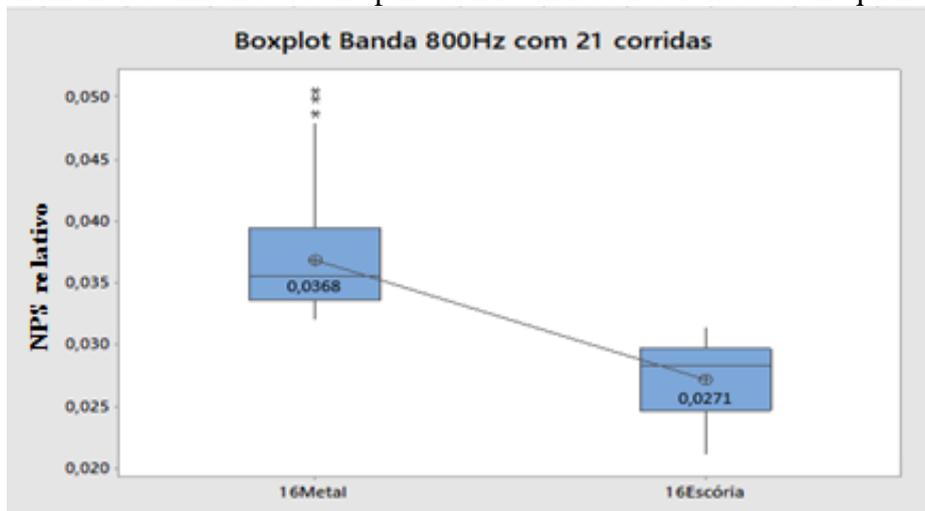
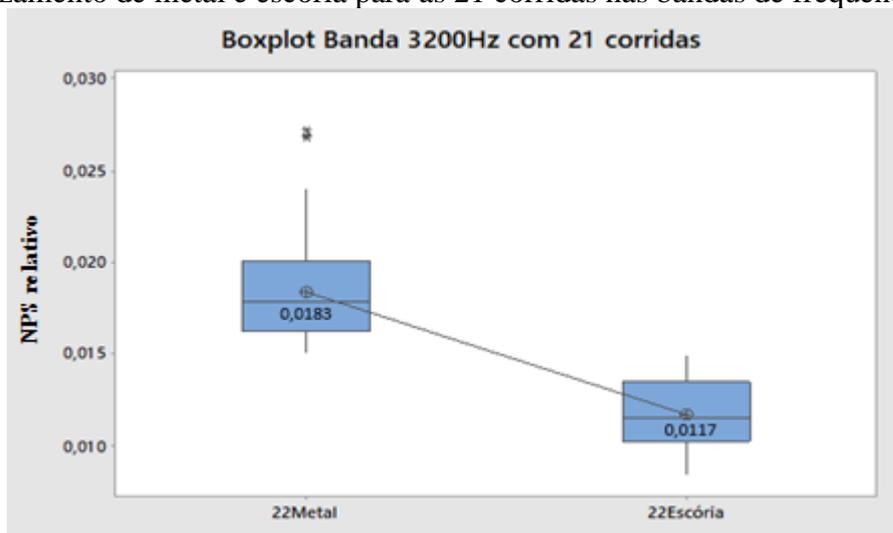


Figura 16 - Análise da distribuição amostral e comparação entre médias dos níveis relativos durante o vazamento de metal e escória para as 21 corridas nas bandas de frequência 3200Hz



5. CONCLUSÃO

Os resultados indicam que é possível fazer a distinção entre a passagem de metal e escória a partir das medições do som. Foi possível identificar, nas medições que foram feitas, duas bandas de frequência onde não houve sobreposição dos valores antes e durante a passagem de escória, sendo elas 800Hz e 3200Hz, para um nível de significância de 99%. Com isso, é sugestivo que nessas bandas de frequência se tenha maior potencial para permitir o desenvolvimento de um software que identifique a passagem ou não da escória.

Para futuras modernizações, ou antes de criar um dispositivo para detecção da passagem de escória, sugere-se analisar o que acontece ao longo do tempo com os parâmetros da vida e manutenção do canal, condições e vida do forno, níveis de carbono, através de medições realizadas por equipamentos que possam ser instalados próximo ao canal de vazamento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLOU, Glen. "Handbook for Sound Engineers: the New Audio Cyclopedia". Indianapolis: Howard W. Sams and Co., 1988.

Beckwith, T., Marangoni, R., Lienhard, J. "Mechanical Measurements". 5 th Ed., Massachusetts: Addison-Wesley, 1993.

Braganca, Saulo Roca Corrosão de refratários utilizados na siderurgia : Parte II : propriedades físicas dos refratários e fatores operacionais. Cerâmica. São Paulo, SP. vol. 58, no. 348 (out./dez. 2012), p. 459-464

CHEVRANT, L.J.S. Treinamento para Aciaria da ArcelorMittal. In 2º SEMINÁRIO DE ACIARIA ELÉTRICA – ARCELORMITTAL BRASIL, Juiz de Fora, 2013.

HAMMERSCHMID, P. et al. K. Vortex formation during drainage of metallurgical vessels. Ironmaking and Steelmaking. v. 11, n. 6, p. 332-39, 1984.

J. Vesanto, J. Himberg, "SOM toolbox for Matlab 5", Helsinki University of Technology P.O.Box 5400, FIN-02015 HUT, Finland, April 2000,
<<https://pdfs.semanticscholar.org/9b4f/6595ab9b851d851a440fe480f3b3bf7ad092.pdf>>, Acessado em 17/11/2019.

JESUS, ROGÉRIO ELEOTÉRIO DE. Reconhecimento de Passagem de Escória no Vazamento de Aço em Convertedores de Aciaria' 15/12/2017 84 f. Mestrado Profissional em ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO Instituição de Ensino: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Serra Biblioteca

JOHN, A.L. Melhorias no Desempenho dos Injetores Supersonicos em operação em um Forno Elétrico a Arco. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Lanman, D. R. "Design of a Sound Level Meter", EN 253: Lecture Notes. Matlab Exercise No.3, 2005.< http://mesh.brown.edu/dlanman/courses/decibel_meter.pdf> , Acessado em 17/11/2019.

LI, J. et al. Application of thermographic slag detection system in baosteel. 2007. AISTech, PR-351-10

PIMENTA, H. M.; VALADARES, C. A. G.; BELLIGOLI, G. C. D. Estudo da passagem de escória na etapa de vazamento de aço panela/distribuidor. 1997. SEMINÁRIO DE ACIARIA DO IAS. 11., 1997, Buenos Aires. [Anais...]. Buenos Aires: [s.n.], 1997. p. 199-207.

Santos, Sandro de Souza; Furtado, Henrique Silva; Silva, Carlos Antonio da; Silva, Itavahn Alves da; Seshadri, Varadarajan. "MODELAGEM FÍSICA DA FORMAÇÃO DE VÓRTICE DURANTE O VAZAMENTO DO AÇO DE UMA PANELA". Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.5, n.1, p. 12-16, jul.-set. 2008

Sato, César Takaci. Simulação do comportamento escória-aço durante o esgotamento da panela através de modelagem física.' 01/03/2007 81 f. Mestrado em ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MINAS Instituição de Ensino: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, BELO HORIZONTE Biblioteca Depositária: Biblioteca Universitária da UFMG

Sylvio R. Bistafa “Acústica aplicada ao controle do ruído” 3ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.

NOMENCLATURA

Símbolo	Definição	Unidade
<i>NPS</i>	Nível de pressão sonora	[dB(A)]
dB(A)	Unidade de decibéis ponderados à curva A	-

ANEXO

Rotina A.1. Código converte dados processados pelo Matlab em uma planilha Excel.

```
function converter_excel( filename_excel, filename_audio, t0)

[tempo, frequencia, amplitude] = retorna_matriz(filename_audio, t0);

tabela = [0 frequencia; tempo' amplitude];

xlswrite(filename_excel, tabela);

end
```

Rotina A.2. Código converte dados processados pelo Matlab em imagens.

```
function plotar_grafico( filename, t0)

[tempo, frequencia, amplitude] = retorna_matriz(filename, t0);

figure;
h = bar(amplitude');
colormap(summer(length(tempo)));
l = cell(1, length(tempo));
for t = 1:length(tempo)
l{t}=num2str(tempo(t));
end
legend(h,l);

end
```

Rotina A.3. Código que converte gravações de áudio em dados numéricos.

```
function [tempo, frequencia, amplitude] = retorna_matriz( filename, t0)

[y, Fs] = audioread(filename);

yt=zeros(Fs+1, length(t0));

for i=1:length(t0)
yt(:,i)=y(t0(i)*Fs:(t0(i)+1)*Fs);
end

BandsPerOctave = 1;
```

```

N = 6;           % Filter Order
F0 = 1000;      % Center Frequency (Hz)
f = fdesign.octave(BandsPerOctave, 'Class 1', 'N,F0', N, F0, Fs);

f.BandsPerOctave = 3;
f.FilterOrder = 8;
F0 = validfrequencies(f);
Nfc = length(F0);

for i=1:Nfc
f.F0 = F0(i);
oneThirdOctaveFilterBank(i) = design(f, 'butter');
end

yf=zeros(Nfc, length(t0));

for j=1:length(t0)
for i=1:Nfc
yf0(:,i) = filter(oneThirdOctaveFilterBank(i), yt(:,j));
end
yf(:,j) = rms(yf0);
end

tempo = t0';
frequencia = 1:Nfc;
amplitude = yf';

```

Rotina 4. Script para rodar os códigos no Matlab com intervalo de tempo especificado.

```

arquivo_excel = 'FILE NAME'; % sem extensao
tempos = ["t8,t7,t6,t5,t4,t3,t2,t1"];
arquivo_audio = 'FILE NAME.m4a'; % com extensao

plotar_grafico(arquivo_audio, tempos);

```


Figura A.16 - Resultados ANOVA da banda número 16 para as 21 corridas

```

Method

Null hypothesis          All means are equal
Alternative hypothesis   At least one mean is different
Significance level       $\alpha = 0,01$ 
Rows unused            6

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor Levels Values
Factor          2  16Metal; 16Escória

Analysis of Variance

Source  DF      Adj SS      Adj MS      F-Value      P-Value
Factor    1  0,004076  0,004076    267,76      0,000
Error    238  0,003623  0,000015
Total    239  0,007699

Model Summary

          S      R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0,0039016  52,94%   52,74%    52,25%

Means

Factor      N      Mean      StDev      99% CI
16Metal    183  0,036847  0,004117  (0,036098; 0,037596)
16Escória  57   0,027163  0,003100  (0,025821; 0,028505)

Pooled StDev = 0,00390158
    
```

Figura A.17 - Resultados ANOVA da banda número 22 para as 21 corridas.

```

Method

Null hypothesis          All means are equal
Alternative hypothesis   At least one mean is different
Significance level       $\alpha = 0,01$ 

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor Levels Values
Factor          2  22Metal; 22Escória

Analysis of Variance

Source  DF      Adj SS      Adj MS      F-Value      P-Value
Factor    1  0,001929  0,001929    353,97      0,000
Error    238  0,001297  0,000005
Total    239  0,003226

Model Summary

          S      R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0,0023345  59,80%   59,63%    59,20%

Means

Factor      N      Mean      StDev      99% CI
22Metal    183  0,018384  0,002456  (0,017936; 0,018832)
22Escória  57   0,011722  0,001888  (0,010919; 0,012525)

Pooled StDev = 0,00233445
    
```