**MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA À PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR: ESTUDO EM UMA INDÚSTRIA DE CUBOS DE RODA PARA O SEGMENTO AUTOMOTIVO PESADO**

**Adriel Jesus de Souza**

Docente – Centro Universitário Fametro - Unifametro

adriel.souza@professor.unifametro.edu.br

**Gleison Ribeiro Cruz**

Docente – Centro Universitário Fametro – Unifametro

**Renan Torquato Almeida**

Docente – Centro Universitário Fametro – Unifametro

**Francisco Antonio Rodrigues da Silva Costa**

Discente – Centro Universitário Fametro – Unifametro

**Área Temática:** Lean Manufacturing e Gestão

**Encontro Científico:** IX Encontro de Iniciação à Pesquisa

**RESUMO**

O processo de fundição para peças em ferro nodular destinadas ao segmento automobilístico pesado, é caracterizado como crítico em se tratando de cubo de roda. O trabalho teve como objetivo investigar a influência dos elementos Enxofre, Cobre e Estanho, para a variável resposta de dureza Brinell em ferro fundido nodular, através de estudo de caso e experimento realizado aplicando a metodologia para delineamento de experimentos de Box – Behnken, modelagem matemática para simulação do sistema real, análises do comportamento e as possibilidades de predição e otimização dos parâmetros de processo. A contribuição deste trabalho é voltada para redução de variáveis do processo e elaboração de processos robustos na obtenção de cubos de rodas automotivas.

**Palavras-chave:** Elementos perlitizantes. Elemento deletério. Cobre, Estanho e Enxofre. Dureza Brinell. Box-Behnken.

**INTRODUÇÃO**

Segundo dados de 2021, a quantidade de veículos em todo mundo vem crescendo em perfil contínuo e exorbitante, com estimativas de 1,2 bilhão de veículos automotivos ativos (NOTÍCIAS AUTOMOTIVAS, 2021). Tendo em vista que os riscos de acidentes automotivas crescem à medida que a população de veículos acompanha o mesmo perfil, o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO estabeleceu os requisitos mínimos para peças e acessórios automotivos (BRASIL, 2011).

Dentre as peças certificadas e consideradas fundamentais como marcadores de segurança automotiva está o cubo de roda, que executa a junção entre a roda e o eixo, realizando a transmissão do movimento do eixo para a roda. Esta peça é composta, dentre outros materiais, por ferro fundido nodular. Entre as características mecânicas para este material, a propriedade de dureza Brinell – considerado o primeiro ensaio reconhecido e padronizado industrialmente, é uma das características mais mensuradas no ambiente industrial. A metodologia consta da aplicação de uma força F, conhecida sobre um penetrador (neste caso esfera), com dureza superior ao do material em análises. A calota esférica é impressa no material em análise e posteriormente seu diâmetro revela a resistência do material à força aplicada.

Diante disto, este trabalho teve como objetivo realizar estudo de caso em uma empresa fabricante de cubo de roda, em ferro fundido nodular, localizada na cidade de Maracanaú – CE, através da modelagem do sistema real para o comportamento da dureza Brinell em função de variações dos elementos estanho, cobre e enxofre presentes na composição do ferro fundido nodular.

**METODOLOGIA**

Realizou-se estudo de caso em uma empresa fabricante de cubo de roda, em ferro fundido nodular, localizada na cidade de Maracanaú – CE, identificando os elementos utilizados para obtenção das propriedades mecânicas desejadas.

Inicialmente, foram definidos os critérios para composição da população de estudo. Para tal, foi realizada pesquisa em uma indústria de fundição, fabricante de cubo de rodas destinado a linha automotiva pesa, para os resultados de experimentos realizados no período de 2017 a março de 2019.

Considerando a população amostral (corridas experimentais realizadas entre o período de 2017 e 2018), o tamanho da amostra foi considerando índice de confiabilidade de mínimo de 95%. Logo, foi estudada uma população amostral contendo 108 casos, com a finalidade de estudar o impacto dos elementos estanho (Sn), cobre (Cu) e enxofre (S), para a propriedade de dureza Brinell em cubo de rodas.

Em experimentos realizados para ferro nodular ferrítico – perlítico, foi observado através das respostas de dureza Brinell, realizados com o equipamento Pantec DHB 3000A (Panambra). Os ensaios de análises químicas foram executados em espectrômetro de emissão óptica Spectrolab Vison 2003 (Spectro Sul Americana).

Considerando a necessidade de entendimento do sistema real, a necessidade de otimização e predição de resultados, foi realizado um estudo de caso e aplicado a metodologia de Box-Behnken. Logo, o delineamento constou de fatores: percentual de cobre (%Cu), percentual de estanho (%Sn) e percentual de enxofre (%S), explorando seus níveis superior e inferior, bem como o ponto médio entre eles +1, 0, -1 (BLEYFOGLE III, 2003). O estudo gerou um total de 15 ensaios, sem a aplicação de réplicas, característica permitido pela metodologia aplicada a 3 fatores.

Foram conduzidos 15 ensaios, justificados na sequência de padronização aleatória (MONTGOMERY, 2013).

Os limites foram definidos com base na região da superfície de reposta de interesse para o projeto (Tabela 1).

Tabela 1 – Limites em estudo para os fatores

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Elemento | Superior | Ponto Central | Inferior |
| (+1) | (0) | (-1) |
| % Cobre (Cu) | 0,45 | 0,325 | 0,20 |
| % Enxofre (S) | 0,020 | 0,0125 | 0,006 |
| % Estanho (Sn) | 0,030 | 0,0145 | 0,006 |

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nas pesquisas iniciais, confirmou-se que as adições de cobre e estanho na liga metálica nodular, aumentaram proporcionalmente de forma linear a dureza para peças avaliadas (GUESSER, 1999). Mas, avaliando esta mesma situação e considerando a presença de enxofre (S >0,015%), observou-se a degradação das propriedades de dureza Brinell, e uma relação curvilínea. Para as condições padronizadas de espessura de parede, processo de nodulização e tempo de desmoldagem, observou-se resultados anteriormente entre 206 e 222HB (para %S < 0,015), e na presença de %S >0,015% e condições similares de cobre e estanho, foram encontrados valores entre 181 e 183 HB. Dada a constatação deste fato, surgiu o interesse para modelar matematicamente este comportamento, como meio de predição e redução das variações de processo.

Na avaliação dos termos da equação gerado para os fatores significantes, os termos considerado com efeito significativo para a resposta de dureza são: %Sn (C), %Cu (B), %S (A) e %S²(AA). Para o gráfico de Pareto, também foram constatados os termos C (%Sn), termo B (%Cu), termo A (%S) e termo AA (%S²). A predição de dureza Brinell em função do percentual de enxofre (%S), cobre (%Cu) e estanho (%Sn), obtida no metal líquido possibilitou uma ação de correção durante a elaboração do metal líquido, período seguro para identificação da não conformidade e correção dela, antes da geração de peças não conforme. A qualidade da modelagem expressa foi confirmada pelo valor S (% de erro) de 4,62%. R-quadrado (R2) (97,53%), R-quadrado ajustado (R²aj) (96,28%) e R-quadrado preditivo (R² pred) (93,47%). O Gráfico 3A mostra os resultados da interação entre %Sn e % Cu para o efeito em HB. Os efeitos de %Cu e %Sn, para a resposta de dureza Brinell se comportam de forma linear e positiva. Ou seja, conforme suas adições ao metal nodular, observa-se o aumento da propriedade de dureza, isto fixando o percentual de enxofre (%S), está fixado em máximo 0,125% (125ppm). No gráfico 3B, é apresentado o novo comportamento para o elemento estanho (%Sn) em função do percentual de enxofre (%S). Neste caso, é observado que o comportamento linear, antes apresentado para o elemento estanho (%Sn), é influenciado em função da presença crescente do teor de enxofre (%S).

Outro elemento que tem seu comportamento afetado é o cobre, conforme Gráfico 4A. Também apresenta comportamento não linear em função da presença de enxofre. Para esta condição o percentual de estanho (%Sn), foi fixado em 0,015% (150ppm) (Gráfico 4B). Levando-se em consideração a perlitização do ferro nodular apenas com observa-se que em função do aumento de cobre para obtenção do mesmo nível de dureza Brinell, os valores adicionais sobressalentes são consideráveis. Para metais elaborados apenas com estanho a situação se repete, conforme apresentado no Gráfico 5A. Para esta condição o percentual de cobre (%Cu), está fixado em máximo 0,01% (valor residual). Uma alternativa disponibilizada nas ferramentas dispostas no MINITAB®, é o gráfico de sobreposição dos efeitos. Para este gráfico (Gráfico 5B) é possível inserir limites de controle (limite superior e inferior), e o gráfico disponibiliza a região especificada em para definição e predição dos resultados.

Com base neste gráfico deseja-se obter dados visando o delineamento próximo ao centro da faixa especificado. Tais resultados demonstram que utilizar %Cu entre 0,32%, pode-se obter um processo robusto claro limitando o teor de enxofre para máximo 0,014%. Para situações com maior teor de enxofre, faz-se necessário ajuste na quantidade de elementos perlitizantes para se obter o mesmo resultado de dureza Brinell.

Figura 1 – Efeitos das relações entre as variáveis %Sn x %Cu e %Sn x %S

|  |  |
| --- | --- |
| A | B |
| 1A - Efeito do do %Sn e %Cu para o efeito em HB; 1B - Efeito do %Sn e %S para a propriedade de dureza Brinell (HB) |

Figura 2 - Efeitos das relações entre as variáveis %Cu x %S e %Cu x %S

|  |  |
| --- | --- |
| A | B  |
| 2A - Efeito do %Cu e %S para a propriedade de dureza Brinell (HB); 2B - Efeito do percentual de cobre e enxofre para a resposta de dureza Brinell. |

Figura 3 - Efeitos das relações entre as variáveis %Cu x %S e %Cu x %S

|  |  |
| --- | --- |
| A | B  |
| 3A - Efeito do percentual de estanho e enxofre para a resposta de dureza Brinell; 3B - Sobreposição de efeitos %Cu e %S para a faixa de dureza Brinell requeridaA modelagem matemática que expressa o comportamento do sistema real analisado é apresentada na equação 1. |

**CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho visou instigar o uso de ferramentas estatísticas – modelagem matemática para superfície de resposta – na redução da variabilidade e elaboração de processos robustos. A ferramenta permitiu mapear os efeitos dos elementos perlitizantes (cobre e estanho) bem como o efeito de degradação das propriedades mecânicas do material (dureza Brinell) em função da variação de valores residuais do enxofre no material. Obtiveram-se dados com valores preditos pela modelagem matemática, que porventura aplicados ao processo de fabricação, apoiam a tomada de decisão prevenindo não conformidades e custos relacionados a não qualidade.

**REFERÊNCIAS**

BLEYFOGLE III, F. W. ImplementingSix Sigma. 2 ed. John Wiley& Sons, Inc: 2003.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. Planejamento de Experimentos usando o Statistica®. 1ed. E-Papers, 2013. 260 p.

GUESSER, W. L. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos. 1 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

GUESSER, W. L.; HILÁRIO, D. G. Ferros Fundidos Nodulares Perlíticos. 1999. Disponível em: http://foundrygate.com/upload/artigos/FERROS%FUNDIDOS%20NODULARES%20PERL%C3%8DTICOS.pdf. Acesso em: 13 maio 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Portaria n.º 301, de 21 de julho de 2011.** Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001718.pdf. Acesso em: 23 maio 2019.

FENAVABRE. **Relatórios.** 2021. Disponível em: http://www3.fenabrave.org.br:8082/plus/. Acesso em: 21 outubro 2021.

NOTÍCIAS AUTOMOTIVAS. **O mundo já tem mais de 1,2 bilhão de veículos**. 2021. Disponível em: https://www.noticiasautomotivas.com.br/o-mundo-ja-tem-mais-de-1-bilhao-de-veiculos. Acesso em: 09 outubro 2021.