



PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS APLICADO AO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO 4340

JULIANO ENDRIGO SORDAN - julianosordan@yahoo.com.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR - SÃO CARLOS

CLÉSIO APARECIDO MARINHO - clesio.marinho@yahoo.com.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR - SÃO CARLOS

ALESSANDRO FRAGA FARAH - alessandro.farah@fatec.sp.gov.br
FACULDADE DE TECNOLOGIA - FATEC - SERTÃOZINHO

MANOEL FERNANDO MARTINS - manael@power.ufscar.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR

PEDRO CARLOS OPRIME - pedro@dep.ufscar.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR - SÃO CARLOS

Área: 2 - GESTÃO DA QUALIDADE

Sub-Área: 2.4 - CONFIABILIDADE DE PROCESSOS E PRODUTOS

Resumo: O PRESENTE ARTIGO TEM COMO OBJETIVO APRESENTAR UMA APLICAÇÃO DO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE) PARA A OBTENÇÃO DE UMA MELHOR DUREZA DO AÇO SAE 4340. PARA A REALIZAÇÃO DESTE EXPERIMENTO FOI UTILIZADA A TÉCNICA DE PLANEJAMENTO FATORIAL COOMPLETO, ONDE OS FATORES: TEMPERATURA DO FORNO, TEMPERATURA DO ÓLEO E TEMPO DE AQUECIMENTO FORAM COMBINADOS PARA IDENTIFICAR A MELHOR COMBINAÇÃO PARA MAXIMIZAR A DUREZA DO AÇO UTILIZADO. OS RESULTADOS INDICARAM QUE O TEMPO DE AQUECIMENTO DO CORPO DE PROVA NO FORNO, É O FATOR QUE MAIS CONTRIBUI PARA A DUREZA DO MATERIAL. A APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS PERMITE A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO AO PREDIZER A MELHOR COMBINAÇÃO DOS FATORES INERENTES AO PROCESSO.

Palavras-chaves: DELINEAMENTO DE EXPERIMENTO; TRATAMENTO TÉRMICO; AÇO SAE 4340.

DESIGN OF EXPERIMENTS APPLIED TO THE HEAT TREATMENT PROCESS OF 4340 STEEL

Abstract: *THE PURPOSE OF THIS PAPER IS TO PRESENT AN APPLICATION OF DESIGN OF EXPERIMENTS TO THE HEAT TREATMENT PROCESS OF AISI 4340 STEEL. THE APPLICATION OF THE EXPERIMENT WAS CARRIED OUT BY THE FACTORIAL DESIGN TO EVALUATE THE EFFECTS OF OVEN TEMPERATURE, OIL TEMPERATURE AND WARM-UP TIME, AND TO FIND THE BETTER COMBINATION TO OPTIMIZE THE HARDNESS OF THE STEEL. THE RESULTS OBTAINED FROM THE STUDY INDICATE THAT WARM-UP TIME IS THE FACTOR THAT MOST INFLUENCES THE HARDNESS OF THE STEEL. THE APPLICATION OF DESIGN OF EXPERIMENTS ALLOWS THE OPTIMIZATION OF THE TREATMENT PROCESS BY PREDICTING THE BEST COMBINATION OF FACTOR INHERENT TO THE PROCESS.*

Keyword: *DESIGN OF EXPERIMENTS; HEAT TREATMENT; AISI 4340 STEEL.*

1. Introdução

A otimização dos processos de fabricação afeta substancialmente a competitividade das empresas inseridas na indústria metal-mecânica. No âmbito da excelência operacional, essa melhoria decorre de ações no processo de transformação que são capazes de gerar resultados em termos de custo, qualidade e tempo. O Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*) representa uma importante técnica para otimizar o processo produtivo ao identificar os principais fatores que influenciam a qualidade do produto e do processo.

Um experimento industrial consiste em uma série de testes desenvolvidos com o propósito de identificar efeitos desconhecidos ou estabelecer hipóteses para melhor entendimento de um processo (ANTONY, 1999). Calegare (2009) salienta que o foco dos experimentos é a descoberta para o aperfeiçoamento do processo ou otimização de suas saídas, visto que através da determinação dos valores necessários dos fatores controláveis do processo é possível obter a saída próxima do valor nominal desejado.

O aço SAE 4340 é amplamente empregado nos processos de fabricação de bielas, eixos e virabrequins nas indústrias automobilística e de máquinas e equipamentos agrícolas, por ser recomendado para componentes que exigem alta resistência mecânica. Esse tipo de aço é também usualmente empregado nas condições temperados e revenidos, onde a temperatura e o tempo de revenimento da microestrutura predominantemente martensítica são escolhidos de acordo com o nível de dureza requerido (ANAZAWA *et al*, 2012). Caballero *et al*. (2001) esclarecem que o comportamento e as propriedades mecânicas dos aços dependem de seu tamanho de grão, da taxa de aquecimento, da presença de inclusões não metálicas, da distribuição das fases e também da natureza da decomposição da austenita no resfriamento contínuo.

O presente trabalho busca identificar a melhor combinação das variáveis inerentes ao processo de tratamento térmico de tempera do aço SAE 4340 com o objetivo de otimizar a dureza deste material. O Planejamento do Experimentos é compreendido com uma alternativa ao processo tradicional de tratamento térmico por têmpera, ao determinar a melhor combinação das variáveis por meio de uma ferramenta analítica, fundamentada no pensamento estatístico.

2. Referencial Teórico

2.1 Planejamento de Experimentos

O Planejamento de Experimentos foi desenvolvido na década de 1920 por R. A. Fisher, em Londres, Reino Unido, com o objetivo de minimizar o número de experimentos necessários para a identificação dos efeitos mais importantes em um projeto fatorial, por meio da análise da variação de vários fatores simultaneamente (DOWLATSHAHI, 2004). De acordo com Rowlands (2003), após a aplicação e disseminação da metodologia principalmente na agricultura, o foco dos estudos de DOE foram direcionados para a indústria química.

Um experimento projetado é um experimento onde se acredita que um ou mais fatores, tenham um efeito sobre o resultado experimental, de acordo com um plano pré-determinado. Os dados coletados em um experimento, podem ser analisados estatisticamente para determinar o efeito das variáveis independentes, ou combinações de efeitos entre essas variáveis (PYSDEK e KELLER, 2011).

Para Montgomery (2016), o planejamento de experimentos são testes conduzidos de forma planejada, em que as entradas (ou fatores ou variáveis controladas) são alteradas de modo planejado para avaliar seu impacto sobre uma saída (ou resposta). Os objetivos do planejamento de experimentos são: (i) determinar que fatores de entrada possuem maior influência sobre a resposta; (ii) determinar como ajustar os fatores, de modo que a resposta tenha o valor desejado; (iii) determinar como ajustar os fatores de modo que a variação da resposta seja a menor possível; e (iv) determinar como ajustar os fatores de modo que os efeitos das variáveis não controladas sobre a resposta sejam mínimos. A figura 1 ilustra o modelo geral de um processo ou sistema no contexto do Planejamento de Experimentos.

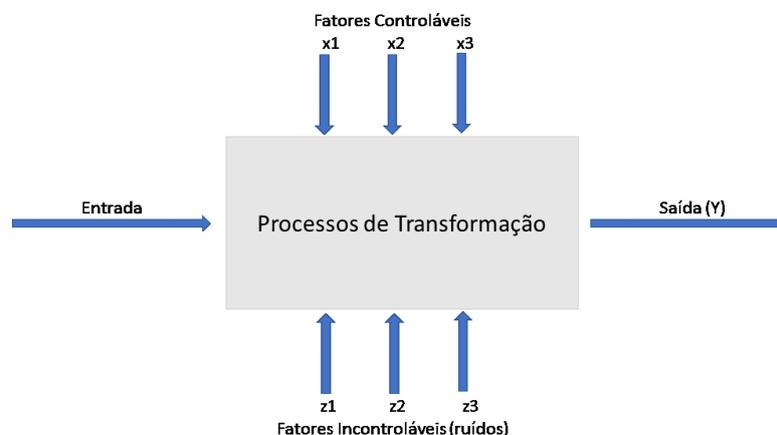


FIGURA 1 – Modelo geral de um processo ou sistema. Fonte: Montgomery (2016)

2.2 Processo de tratamento térmico

O processo de Tratamento Térmico de aços é um procedimento bastante utilizado pela indústria metal-mecânica, principalmente quando se necessita desenvolver peças e equipamentos com maior resistência mecânica aliada a uma boa resistência a impactos e que cumpra a função projetada. O tratamento térmico de têmpera é realizado mediante aquecimento do material dentro do campo austenítico, seguido de resfriamento rápido para a obtenção de martensita (BALAN *et al.*, 1998; RODRIGUES *et al.*, 2000). Esse processo é utilizado para controlar as diversas fases que podem se formar na microestrutura do aço, bem como controlar a morfologia e o tamanho de grão (ANAZAWA *et al.*, 2012).

Dessa forma obtém-se uma variedade de propriedades que permitem que as ligas sejam adequadas a diversas aplicações, conseguindo-se tais efeitos com reduzidos gastos financeiros. Os principais parâmetros envolvidos no tratamento térmico são: taxa de aquecimento e resfriamento, temperatura e tempo de austenitização e ciclos de revenimento (Gooch, 1995).

O aço ABNT 4340 é muito utilizado na fabricação de peças que exigem boa combinação de resistência e tenacidade, apresentando boa forjabilidade e a mais alta temperabilidade entre os aços de construção mecânica, sendo de difícil soldabilidade e usinabilidade. Tais propriedades são obtidas por meio do beneficiamento através de têmpera e revenimento (ALVES *et al.*, 2011).

3. Método

O presente trabalho tem como objetivo otimizar o processo de tratamento térmico de têmpera do aço 4340 para obtenção da melhor dureza para o material por meio do planejamento de Experimentos. Neste sentido, a sequência de atividades previstas para o experimento foi conduzida de acordo com a sistemática proposta por Dowlatshahi (2004), adaptada em 6 etapas apresentadas a seguir.

3.1 Etapa 1: Formação da equipe multidisciplinar.

A equipe foi constituída por profissionais com conhecimento nas principais variáveis inerentes ao processo de tratamento térmico e contou com a participação de dois profissionais que atuam na área de excelência operacional (com certificação em *master black belt* e *green belt*), um engenheiro metalúrgico e dois tecnólogos em processos de soldagem.

3.2 Etapa 2: Definição dos objetivos do experimento.

Durante uma seção de *brainstorming*, os membros da equipe decidiram que o objetivo do experimento seria estudar qual o melhor conjunto de fatores para a obtenção de maior dureza do material utilizado. Segundo Callister (2000), as medidas de dureza representam a maneira mais simples e rápida de se avaliar a resistência mecânica dos materiais.

3.3 Etapa 3: Elaboração do diagrama de causa e efeito.

O aspecto mais difícil de um planejamento de experimentos é a identificação das variáveis (fatores) a serem medidas e analisadas no estudo (DOWLATSHAHI, 2004). Neste sentido, a equipe multidisciplinar elaborou um diagrama de causa e efeito para a compreensão dos fatores responsáveis pela variabilidade no processo de tratamento térmico. A figura 2 ilustra as variáveis identificadas no diagrama de causa e efeito.

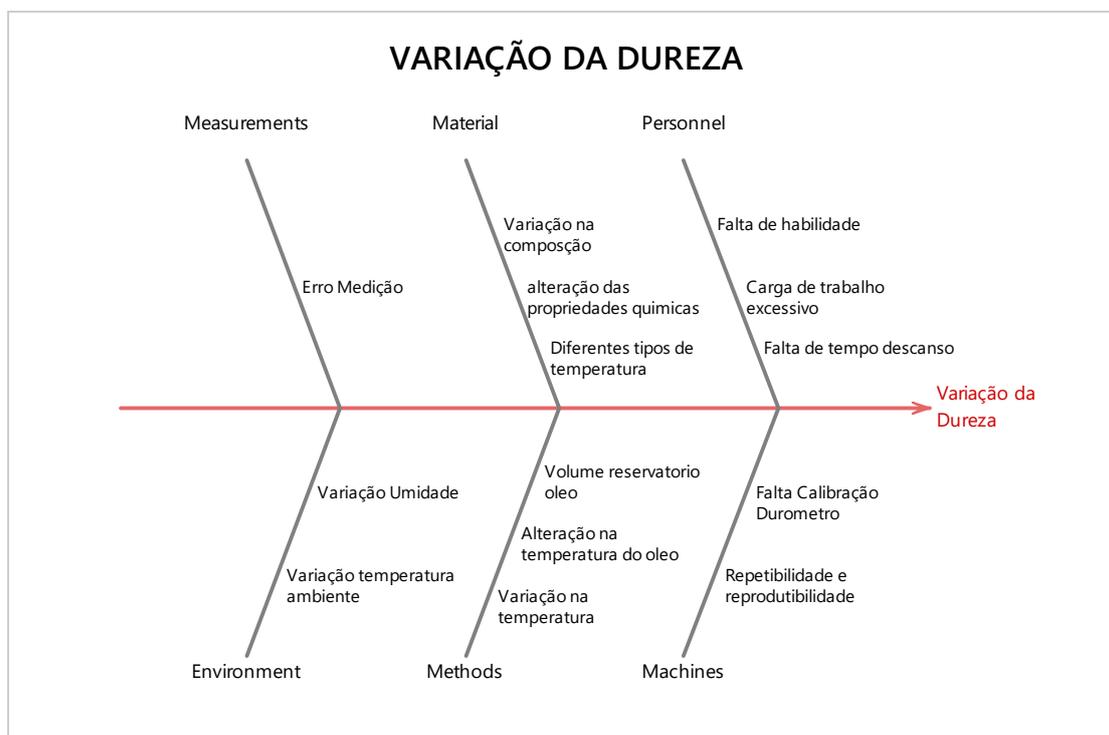


FIGURA 2 – Diagrama de Causa e Efeito

3.4 Etapa 4: Identificação das variáveis resposta e Planejamento do Experimento

Durante esta fase, a equipe multidisciplinar selecionou três variáveis para a realização do experimento: (i) temperatura do forno, (ii) tempo de aquecimento ou permanência dos corpos de prova no forno e (iii) temperatura do óleo mineral utilizado na têmpera. Dez corpos de prova com dimensão de 8 milímetros de espessura por 24 milímetros de diâmetro, foram preparados para o experimento. A equipe multidisciplinar optou pela realização de um DOE

fatorial completo, considerando todas as combinações possíveis entre os fatores identificados. O experimento foi planejado para três (03) fatores, três (03) níveis definidos para o estudo e vinte e sete (27) corridas. Devido às dificuldades de alteração dos parâmetros do processo o DOE não foi replicado e randomizado. A tabela 1 apresenta os fatores e níveis utilizados no experimento.

TABELA 1 – Fatores e Níveis do DOE

Fatores	Baixo	Médio	Alto	Unidades de medida
Tempo de aquecimento	15	20	25	minutos
Temperatura do forno	830	840	850	°C
Temperatura do óleo	35	40	45	°C

3.5 Etapa 5: Realização e análise do experimento.

Os dados coletados nas vinte e sete (27) corridas do experimento foram analisados através do *software* Minitab® 17, onde todas as combinações possíveis entre os fatores definidos para o estudo foram consideradas. Os corpos de prova foram encaminhados ao laboratório de Tratamento Térmico, Fundição e Mecânica, onde foram inseridos em um forno tipo mufla, com temperatura máxima de 1200 °C, e submetidos à variação dos fatores definidos para o DOE. Os equipamentos utilizados para as medições do experimento estavam calibrados, conforme padrão de dureza Panambra EP09117154, dureza 60,3 HRC, +/- 0,5. Após a realização dos ensaios e medição da variável resposta (dureza) os dados foram inseridos Minitab® 17 para posterior análise. Os resultados desta análise são apresentados na seção 4.

3.6 Etapa 6: Identificação dos fatores significantes e condições ótimas para o processo.

A identificação dos fatores significantes foi conduzida por meio do valor da probabilidade (P-valor) a fim de verificar a existência de efeitos principais considerando um nível de significância (α) de 5%. A partir do modelo de regressão linear é possível definir as condições ótimas ou parâmetros de trabalho para os fatores analisados.

4. Resultados e discussão

Após a realização do planejamento fatorial completo foram realizadas medições da variável resposta através da avaliação da dureza nos corpos de prova, por meio de um durômetro analógico Pantec, modelo 300JW. Tal variável é de natureza quantitativa e classificada como variável contínua. As combinações dos fatores temperatura e tempo de forno e seus respectivos resultados são ilustrados na tabela 2.

TABELA 2 – Combinações utilizadas no experimento

Corrida	Temperatura do Forno	Tempo de Forno	Temperatura do Óleo	Dureza
1	830	25	35	52,0
2	840	20	45	52,5
3	830	20	45	51,5
4	840	25	45	48,0
5	830	25	45	53,5
6	830	15	40	55,0
7	830	20	35	52,5
8	840	25	40	52,0
9	850	25	35	52,0
10	850	25	40	53,0
11	850	20	40	53,5
12	830	15	35	52,0
13	840	15	45	54,0
14	830	20	40	54,5
15	830	25	40	50,5
16	850	20	35	55,5
17	840	15	40	51,5
18	840	15	35	51,0
19	830	15	45	53,5
20	850	15	45	54,5
21	850	15	40	55,0
22	840	20	35	53,5
23	840	25	35	52,5
24	850	25	45	53,0
25	850	15	35	55,0
26	850	20	45	55,0
27	840	20	40	52,5

A tabela 3 apresenta os resultados do experimento considerando os efeitos dos principais fatores. Na última coluna tem-se o valor da probabilidade (P-Valor) de cada efeito, com base no qual se decide se os termos são significantes ou não. Observando os valores de P, onde considera-se significativo valores menores que 0,05 para um nível de confiança de 95%, torna-se evidente que a variável *Tempo de Aquecimento* influencia substancialmente a dureza do material. O modelo matemático obtido por meio da regressão linear múltipla para a predição da dureza é:

$$Dureza = -685 + 0,86 \text{ Temperatura Forno} + 28,6 \text{ Tempo Aquecimento} + 15,8 \text{ Temperatura Oleo} - 0,0333 \text{ Temperatura Forno*Tempo Aquecimento} - 0,0183 \text{ Temperatura Forno*Temperatura Oleo} - 0,65 \text{ Tempo Aquecimento*Temperatura Oleo} + 0,00075 \text{ Temperatura Forno*Tempo Aquecimento*Temperatura Oleo}$$

TABELA 3 - Estimativa dos efeitos, coeficientes e P-valor para os fatores e interações

Termos	Efeito	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constante		52,926	0,311	170,31	0,000
Temperatura Forno (TP)	1,278	0,639	0,381	1,68	0,110
Tempo Aquecimento (TA)	-1,667	-0,833	0,381	-2,19	0,041
Temperatura Óleo (TO)	-0,056	-0,028	0,381	-0,07	0,943
TP * TA	-0,333	-0,167	0,466	-0,36	0,725
TP * TO	-0,333	-0,167	0,466	-0,36	0,725
TA * TO	-1,000	-0,500	0,466	-1,07	0,297
TP * TA * TO	0,375	0,188	0,571	0,33	0,746

Ao observar os gráficos de Pareto (a), Efeitos Principais (b), Interação (c) e Otimização (d) na Figura 4, percebe-se que o fator *tempo de aquecimento* cria uma forte mudança das médias, enquanto a *temperatura de forno* também apresenta um efeito considerável, visto que quanto menor o P-valor, mais forte é a justificativa para a rejeição da hipótese nula.

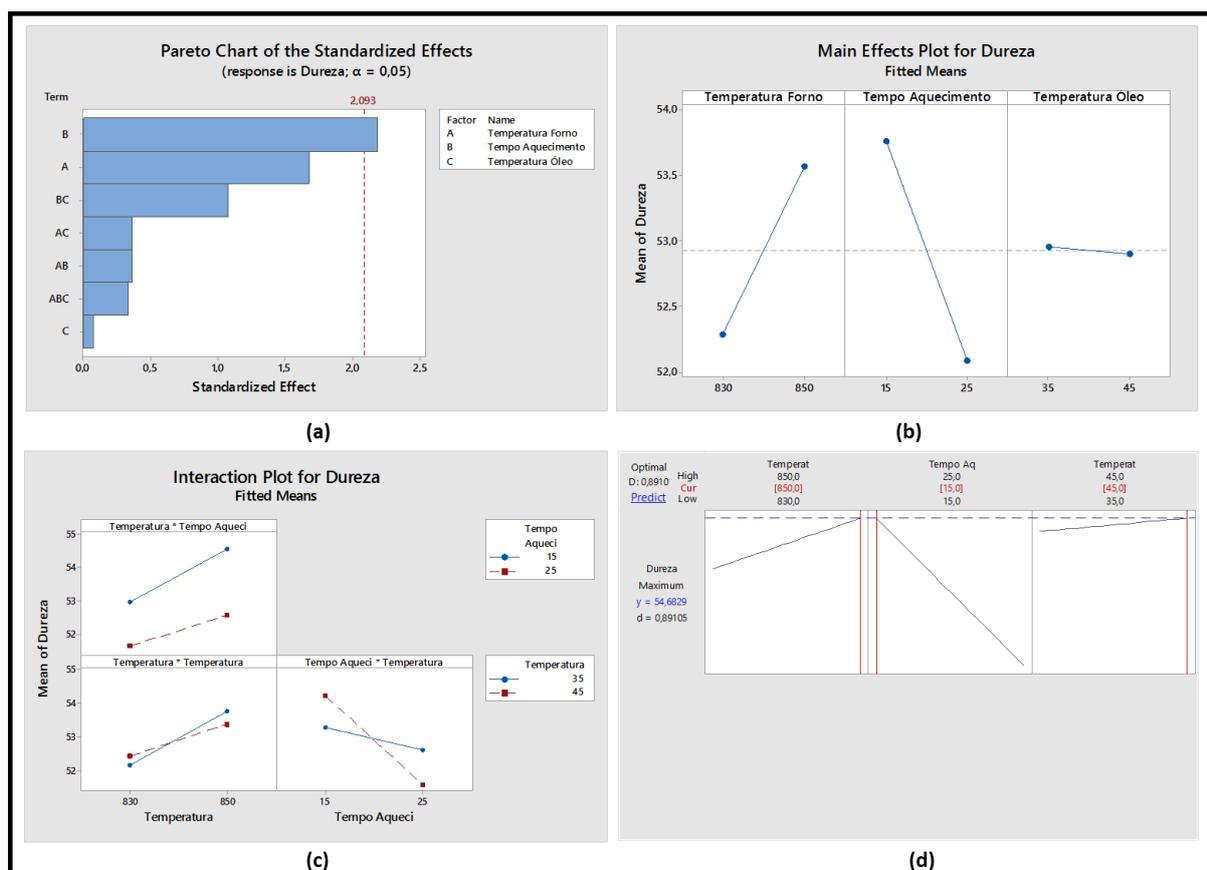


FIGURA 4 – Gráfico de Pareto (a) Efeitos Principais (b), Interação (c) e Otimização (d)

Como é possível observar no gráfico de interação (C) da Figura 4, os fatores *temperatura forno x temperatura óleo* e *tempo de aquecimento x temperatura forno* apresentam interações que podem influenciar os efeitos principais. Sabendo-se que os valores da variável resposta devem ser maximizados, com o propósito de obter maior resistência do metal, é possível encontrar a melhor combinação das variáveis que otimizam a resposta, conforme ilustrado no gráfico de otimização (d), onde o modelo de predição sugere a temperatura de forno em 850°C, um tempo de aquecimento de 15 minutos e temperatura do óleo em 45°C.

5. Considerações Finais

A proposta deste trabalho foi apresentar a realização de um Planejamento de Experimentos (DOE), tendo como objetivo a otimização do processo de tratamento térmico de têmpera do aço 4340 para obtenção da melhor dureza para este tipo de material. O estudo revelou os parâmetros que mais influenciam o processo, de modo a reconhecer o melhor ajuste dos fatores, e por fim, a identificação dos modelos matemáticos para melhor prever os resultados do processo em questão. Os resultados obtidos através das análises realizadas apontaram que a aplicação do DOE no processo de tratamento térmico foi bem sucedido.

A otimização do processo de tratamento térmico pode ser evidenciada por meio de outros ensaios, tais como o resfriamento dos corpos de prova por meio da água, ar, e óleo, bem como a volume dos recipientes com água e óleo, e também pelo aumento ou diminuição dos tempos de permanência dos corpos de prova no forno. Em suma, é possível concluir que o Planejamento de Experimentos pode ser aplicado no processo de tratamento térmico com o propósito de identificar e ajustar os principais fatores que influenciam a qualidade do produto final, otimizando desta forma, os resultados em termos de custo, qualidade e tempo. Propõe-se, portanto, a realização e ampliação deste tipo de estudo para outros processos na indústria metal-mecânica.

Referências

- ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência da lubrificação na qualidade superficial de metais retificados. *Revista Escola de Minas – REM*, n.64, p. 505-512, 2011.
- ANAZAWA, R. M.; ABDALLA, A. J.; HASHIMOTO, T. M.; PEREIRA, M. S. Estudo comparativo das propriedades mecânicas em aços 4340 e 300M submetidos a tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*. V. 31, n. 1-2, p. 32-37, 2012.
- ANTONY, F. Ten useful and practical tips for making your industrial experiments successful. *The TQM Magazine*. v. 11, n. 4, p. 252-256, 1999.

- BALAN, K.P. et al. Austenite precipitation during tempering in 16Cr-2Ni martensitic stainless steels. *Scripta Materialia*, v. 39, n.7, p. 901-905, 1998.
- CABALLERO, F. G.; CAPDEVILA, C.; ANDRÉS, C. G. Modelling of kinetics of formation in steels with different initial microstructure. *The Iron and Steel Institute of Japan – ISIJ*. v. 41, p. 1093-1102, 2001.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000.
- CALEGARE, A. J. A. *Introdução ao Delineamento de Experimentos*. São Paulo: Blucher, 2009.
- CHIAVERINI, V. *Tratamento Térmico das Ligas Metálicas*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- DOWLATSHAHI, S. An application of design of experiments for optimization of plastic injection molding processes. *Journal of Manufacturing Technology Management*. v. 15. n. 6, p. 445-454, 2004.
- GIJO, E. V.; BHAT, S.; JNANESH, N. A. Application of six sigma methodology in a small-scale foundry industry. *International Journal of Lean Six Sigma*. v. 5, n. 2, p. 193-211, 2014.
- GOOCH, T.G. “Heat Treatment of Welding 13%Cr-4%Ni Martensitic Stainless Steel for Sour Service”, *Welding Research Supplement*, 1995, p. 213-222.
- MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao controle estatístico da qualidade*. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.
- MONTGOMERY, D.C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. Rio de Janeiro. LTC, 2013.
- OLIVEIRA, F. B. Planejamento estatístico de experimentos aplicado a melhoria do processo de solda por plasma de arco transferido sobre a sede das válvulas automotivas. *XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2009.
- PYSDEK, T.; KELLER, P. A. *Seis Sigma guia do profissional: um guia completo para green belts, black belts e gerentes em todos os níveis*. Rio de Janeiro: Alta Books, 2011.
- RODRIGUES, J.G.G., MARTINEZ, G.B., BRAVO, V.M. Effect of heat treatment on the stress corrosion cracking behavior of 403 stainless steel in NaCl at 95°C. *Materials Letters*, v.43, p.208-214, 2000.
- ROWLANDS, H; ANTONY, F. Application of design of experiments to a stop welding process. *Assembly Automation*. V. 23, n. 3, p. 273-279, 2003.