

Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização

Prof. Ms. Cristie Diego Pimenta (FEG UNESP – SP/Brasil) - pimentadiego@yahoo.com.br
• Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá-SP, fone: (55) 12-3123-2855
Prof. Dr. Messias Borges Silva (FEG UNESP – SP/Brasil) - messias.silva@feg.unesp.br
Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro (FATEA – SP/Brasil) - rosinei1971@gmail.com
Prof. Dr. Fernando Antonio Elias Claro (UNITAU – SP/Brasil) - fernandoclaro@uol.com.br

RESUMO Métodos estatísticos têm sido usados para melhorar processos e acelerar o desenvolvimento tecnológico industrial. O objetivo deste trabalho foi investigar a influência das variáveis de processo do tratamento térmico de esferoidização dos arames de aço SAE 51B35 e buscar a melhor condição de ajuste de determinados parâmetros de processo, para reduzir a profundidade de descarbonetação superficial. Quatro fatores foram identificados como potencialmente importantes para a qualidade do material. Cada um destes fatores foi estudado a dois níveis e todas as corridas experimentais foram realizadas em ambiente de produção. Para conduzir esta pesquisa de maneira clássica, seria necessário um grande número de experimentos, o que implicaria em alto custo; entretanto, pelo uso do Método Taguchi, estruturado numa matriz fracionada saturada L8, foi possível reduzir em 50% o esforço experimental. O estudo permitiu concluir que o ajuste dos fatores significativos em seus melhores níveis, resulta em substancial redução da espessura da camada descarbonetada, atendendo às especificações do produto.

Palavras-chave Arame de aço SAE 51B35; Método Taguchi; Tratamento térmico de esferoidização.

ABSTRACT *Statistical methods have been used to improve processes and to speed up industrial technological development. The purpose of this research was to investigate the influence of the process variables in the Spheroidization thermal treatment of SAE 51B35 steel wires and find out the best setting for selected process parameters to reduce the decarburization layer depth. Four factors were identified as potentially significant for the material quality. Each one of them was studied at two levels and all the trial runs were carried out in a production environment. To develop this study in a classic manner, a high number of trial runs would be required what would drastically increase the experimentation cost, however, by using the Taguchi method, structured in a L8 saturated fractional matrix, it was possible to reduce the experimental effort by 50%. The study led to the conclusion that setting all significant factors at their best levels would substantially reduce the decarburization layer depth, thus meeting the product specifications.*

Keywords SAE 51B35 Steel wire; Taguchi method; Spheroidization thermal treatment.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as indústrias têm buscado cada vez mais a redução de custos, defeitos e variabilidade. Com isto, a aplicação de métodos estatísticos nos processos de manufatura e de serviços tem se constituído em fator importante e diferencial entre as empresas.

Estudos estatísticos não são usados apenas para análise de dados, mas principalmente para o planejamento dos experimentos em que esses são coletados. Por mais sofisticada que seja a análise que se faça, a falta de planejamento pode causar grande insucesso e em muitos casos, muito tempo pode ser perdido até que o pesquisador perceba que ele deveria ter planejado seus experimentos adequadamente.

O método Taguchi possibilita determinar a melhor combinação de fatores e interações que influenciam no comportamento da variável-resposta de determinado processo. Geralmente, o uso do método requer menor esforço de amostragem, diminuindo o custo com ensaios, sem grande prejuízo às conclusões obtidas (ROSA *et al.*, 2009).

Este artigo retrata a aplicação do método Taguchi como ferramenta estatística para planejar experimentos e tem como principal objetivo, investigar os fatores e interações que influenciam e causam o problema de descarbonetação, durante o tratamento térmico de esferoidização de arames de aço SAE 51B35 trefilado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Descarbonetação

A descarbonetação é um fenômeno que pode ocorrer durante o tratamento térmico de aços e envolve a perda de carbono na superfície do material. A descarbonetação está relacionada com a microestrutura do material e, conseqüentemente, com as suas propriedades.

As principais conseqüências da descarbonetação são a perda de dureza superficial, limite de resistência à tração, resistência ao desgaste e resistência à fadiga, devido ao empobrecimento do carbono da superfície, podendo desqualificar o material para funções que ele normalmente desempenharia. A descarbonetação é mais grave para aplicações em que o material não é submetido a tratamento superficial, como por exemplo, a cementação.

Segundo Tschiptschin (1980), a descarbonetação pode ocorrer por diversas situações, dependendo das características específicas do tratamento térmico. A perda de carbono da superfície do material acontece em conseqüência de fatores como a temperatura e tempo de tratamento, atmosfera do forno (presença de gases oxidantes como o oxigênio, dióxido de carbono e vapor d'água), teor de carbono e de elementos de liga do aço. Ela pode ocorrer por reações químicas do material com o hidrogênio ou com óxidos de ferro; neste último caso, formando-se a carepa (camada superficial de oxidação).

Segundo Callister (2002), quanto mais refinada a estrutura ou mais encruado estiver o material, maior será a possibilidade de ocorrer a descarbonetação.

Por comparação com padrões, pode-se classificar a descarbonetação em três tipos básicos (HERNANDEZ JR. *et al.*, 2010):

- Tipo 1: Região superficial com espessura mensurável com ferrita livre de carbonetos e, sob esta camada de ferrita pura, cresce a fração de perlita, com o afastamento da superfície;
- Tipo 2: Ocorre na superfície uma perda superior a 50% do valor médio do teor de carbono do aço, porém sem a descarbonetação completa desta região; e
- Tipo 3: Ocorre na superfície uma perda inferior a 50% do valor médio do teor de carbono do aço.

Conforme Callister (2002), o método mais difundido de análise da descarbonetação é a metalografia. A preparação de amostras metalográficas geralmente requer cinco operações: corte; embutimento; lixamento; polimento e ataque.

2.2. Método Taguchi e análise de variância (ANOVA)

Segundo Lima *et al.* (2011), o planejamento de experimentos é a metodologia mais adequada para estudar vários fatores de processo e a complexidade de suas interações, de forma a aumentar a probabilidade de solucionar problemas, através de análises estatísticas. Essa metodologia é considerada poderosa para a melhoria da qualidade e produtividade, tendo sido, nos últimos anos, cada vez mais aplicada na indústria brasileira, principalmente pelas do segmento automobilístico (SILVA e SILVA, 2008).

Segundo Souza *et al.* (2011), Robin *et al.* (2010) e Rosa *et al.* (2009), o planejamento de experimentos é muito utilizado para se definir quais dados e em quais condições devem ser coletados durante a experimentação, para garantir melhor precisão estatística na análise de resultados. Segundo Neto *et al.* (2007), a aplicação deste método na sua forma tradicional, com matrizes completas 2^k , onde k representa a quantidade de fatores investigados e uma réplica completa requer $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observações, implica em um grande número de experimentos, o que pode tornar inviável o estudo, devido aos altos custos com ensaios.

Segundo Benyounis e Olabi (2008), a aplicação de planejamento de experimentos também pode ser realizada utilizando matrizes fracionadas, proporcionando redução significativa na quantidade de experimentos. A aplicação da matriz fracionada implica, entretanto, em prejuízo à análise estatística, pois se confunde os efeitos dos fatores com os das interações.

Entre 1950 e 1960, o Dr. Genichi Taguchi desenvolveu o projeto robusto e aplicou esse método em muitas indústrias, dentre elas, a eletrônica e a automotiva (SOUZA *et al.*, 2011).

O método Taguchi possibilita a investigação das variáveis de entrada do processo e suas interações com número reduzido de experimentos. O método torna possível reduzir significativamente a quantidade de experimentos originalmente planejados, por se tratar de uma estrutura composta por matrizes fracionadas saturadas, que proporciona grande redução de custos relativos à experimentação, podendo ser implementado em situações que envolvam produtos e/ou processos.

A metodologia de Taguchi é definida por dois parâmetros importantes:

- Redução na variabilidade, ou seja, emprego da engenharia da qualidade no produto ou processo, buscando a melhoria contínua e menor desperdício para empresa;
- Aplicação do planejamento estratégico, de forma adequada, objetivando o desenvolvimento de novas pesquisas, visando à otimização do processo e à redução de experimentos em situações reais, repercutindo diretamente em redução de custos com experimentação.

Para definição dos experimentos, são utilizados vários arranjos ortogonais (matrizes experimentais), genericamente designados por L_n , onde “n” representa o número de experiências a realizar. As matrizes mais usuais são as L_4 , L_8 , L_9 , L_{12} , L_{16} , L_{18} , L_{27} e L_{32} para fatores de dois e três níveis. As matrizes são utilizadas no projeto de experimentos, com a finalidade de estudar as variáveis significativas e suas interações, que ocorrem ao mesmo tempo.

Taguchi definiu que a escolha do arranjo ortogonal pode ser feita pelo método da contagem do número de graus de liberdade, que é o número de fatores menos um, e desenvolveu gráficos lineares e tabelas triangulares, que permitem a identificação de interações e a atribuição dos fatores (ROSS, 1995).

O método Taguchi faz uso da razão Sinal – Ruído (S/R), que é uma função logarítmica usada para otimizar o processo ou projeto do produto, minimizando a variabilidade. Esta grandeza é derivada da indústria de comunicações, onde já tem sido utilizada por quase um século, representando a relação entre sensibilidade e variabilidade de um dado sistema de medição. Segundo Souza *et al.* (2011), existem três tipos de relação (S/R):

- Menor é melhor (quanto menor o valor da resposta, melhor é para o processo);
- Maior é melhor (quanto maior o valor da resposta, melhor é para o processo);
- Nominal é melhor (quanto mais próximo da especificação, melhor é para o processo).

O tipo de característica ou especificação dita a escolha dentre elas.

A ANOVA é um método estatístico utilizado para interpretar os dados experimentais nas tomadas de decisões e para testar estatisticamente as médias dos resultados, em suas diferentes condições (MONTGOMERY e RUNGER, 2009). Com a ANOVA, pode-se comparar três ou mais fatores e suas interações, podendo ser utilizada complementarmente ao método Taguchi, fazendo uso do teste F, para comprovar quais são os fatores realmente significantes no processo (ROSA *et al.*, 2009; CORREIA e CARDOZA, 2011).

3. MATERIAL E MÉTODO DA PESQUISA

3.1. Arame de aço trefilado esferoidizado

O arame de aço trefilado esferoidizado é um produto muito utilizado na construção mecânica, pois é a matéria-prima utilizada para a fabricação de vários produtos, tais como: parafusos; correntes; rolamentos e capas para velas de automóveis.

Esse produto tem uma grande demanda de consumidores no Brasil e no mundo, pois são utilizados em máquinas em diversos setores e, principalmente, pela indústria automobilística.

O material usado neste trabalho foi o arame de aço SAE 51B35 trefilado a frio, com diâmetro de 12,85mm, redonda. A análise química foi realizada no laboratório químico da empresa financiadora da pesquisa, utilizando espectrômetro de emissão ótica, marca ARL. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do arame de aço SAE51B35 usado na pesquisa.

C %	Ni %	Si %	Mn %	P %	Mo %	Al %	Cu %	S%	Cr%	B %
0,35	0,07	0,25	0,46	0,021	0,020	0,022	0,15	0,002	0,97	0,0017

Fonte: elaboração dos autores.

3.2. Características do forno de tratamento térmico

Para este estudo, foi utilizado um forno tipo campânula de alta convecção, com capacidade de tratamento térmico para 20 toneladas de arame por ciclo.

O princípio de operação dos fornos tipo campânula resume-se basicamente no aquecimento e resfriamento de material carregado na base, protegido pela campânula de proteção, com pressão interna sempre positiva. Esta pressão obtém-se pela injeção de gás inerte protetor (N₂), com vazão de 200m³/h nos primeiros 90 minutos de purga e 300m³/h, após a purga inicial. A manutenção da pressão interna positiva tem como objetivo evitar a entrada de oxigênio no interior da base (campânula de proteção).

Segundo Hernandez Jr., Fonseca e Dick (2010), o tratamento térmico de esferoidização é largamente utilizado em aços de médio e alto carbono, com a finalidade de produzir uma estrutura de carbonetos globulares em uma matriz ferrítica. Esta estrutura proporciona a diminuição da dureza, o aumento da ductilidade e da usinabilidade.

As cargas de aço (SAE 51B35) utilizadas nesta pesquisa foram tratadas segundo os ciclos X e Y, cujas configurações de tempo e temperatura estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características dos ciclos de tratamento térmico.

Etapa	CICLO X			CICLO Y		
	Temperatura (°C)		Tempo (Minutos)	Temperatura (°C)		Tempo (Minutos)
	Início	Fim		Início	Fim	
1	25	760	1320	25	765	1485

Fonte: elaboração dos autores.

3.3. Escolha do arranjo ortogonal

A escolha do arranjo ortogonal mais adequado para a situação foi baseada na quantidade de fatores estudados. Como, neste caso, seria necessário estudar quatro fatores e suspeitava-se da existência de duas interações, foi escolhido o arranjo ortogonal L8 (veja Tabela 3).

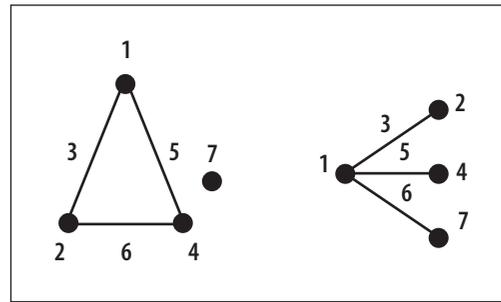
Tabela 3 – Arranjo ortogonal L₈.

Experimentos	Colunas						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Fonte: elaboração dos autores.

Os números 1 e 2, no interior da Tabela 3, referem-se, respectivamente, aos níveis baixo e alto de cada fator. A alocação de cada fator, nas respectivas colunas, foi feita utilizando o gráfico linear de Taguchi, mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Gráfico linear.



Fonte: Adaptado de Ross (1995).

Nas colunas 1, 2, 4 e 6, foram colocados os quatro fatores a serem estudados. A coluna 3 resulta da interação entre os fatores das colunas 1 e 2; a coluna 5 resulta da interação entre os fatores das colunas 1 e 4. A coluna 7 ficou reservada para estimar o erro experimental, necessário para verificar a significância dos fatores.

3.4. Seleção dos fatores e da variável resposta

Para a seleção dos fatores foram levantadas as possíveis causas que poderiam influenciar na descarbonetação do arame, sendo selecionados os seguintes:

- Oxidação (carepa), admitindo-se por hipótese, que os óxidos de ferro contidos na carepa, de alguma forma, durante o tratamento de esferoidização, pudessem reagir com a camada superficial do arame de aço, subtraindo o carbono do mesmo;
- Umidade, supondo que o oxigênio emitido pela amostra na condição úmida, durante o aquecimento, descarbonetasse o aço;
- Ciclo de tratamento térmico, supondo que o tempo e a temperatura tivessem influência na descarbonetação;
- Ponto de orvalho, supondo que a quantidade de oxigênio dentro do forno tivesse influência na descarbonetação;
- Interação entre carepa e ciclo de tratamento térmico, supondo que os óxidos reagissem com o tempo e temperatura;
- Interação entre carepa e ponto de orvalho, supondo que os óxidos interagissem com oxigênio dentro do forno (caso houvesse oxigênio em seu interior).

A seleção dos níveis dos fatores foi baseada na condição real do processo, ou seja, o mínimo e o máximo para todos os fatores, veja Tabela 4.

A variável resposta é a profundidade de descarbonetação (Tipo I), após tratamento térmico, cuja especificação é de 0,10 mm máximo.

Tabela 4 – Fatores e seus níveis.

Fatores	A-Carepa	B-Ciclo de Tratamento Térmico	C-Interação entre fatores A e B	D-Ponto de Orvalho	E-Interação entre fatores A e D	F-Umidade do Material
Coluna	1	2	3	4	5	6
Nível 1	Com Carepa	X		< -35		Seco
Nível 2	Isenta de Carepa	Y		> = -25		Úmido

Fonte: elaboração dos autores.

3.5. Preparação das amostras para a experimentação

A matéria-prima (arame de aço SAE 51B35 trefilado) selecionada para realização dos experimentos foi obtida de um mesmo lote de fabricação, para que houvesse a menor variação possível em relação à descarbonetação inicial, já que dificilmente seria possível obter neste processo materiais isentos desta característica.

A amostra foi enviada para o laboratório da empresa financiadora da pesquisa, para medir a descarbonetação inicial, encontrando-se para ela, nesta análise, um valor médio de 0,03mm de profundidade. A amostra foi subdividida em 48 segmentos de aproximadamente 200 mm de comprimento, usados para realizar 8 experimentos, com 6 réplicas cada. Metade da amostra (isto é, 24 segmentos) foi deixada com a superfície em estado original de trefilação e a outra metade foi decapada quimicamente para remoção da carepa (oxidação). A Tabela 5 descreve os experimentos realizados.

Tabela 5 – Descrição dos experimentos.

Experimentos	Descrição
01	Com carepa , Ciclo X, Ponto de orvalho < -35, Material seco.
02	Com carepa, Ciclo X, Ponto de orvalho >= -25, Material úmido.
03	Com carepa, Ciclo Y, Ponto de orvalho < -35, Material úmido.
04	Com carepa, Ciclo Y, Ponto de orvalho >= -25, Material seco.
05	Isenta de Carepa , Ciclo X, Ponto de orvalho < -35, Material seco.
06	Isenta de Carepa ,Ciclo X, Ponto de orvalho >= -25, Material úmido.
07	Isenta de Carepa , Ciclo Y, Ponto de orvalho < -35, Material úmido.
08	Isenta de Carepa , Ciclo Y, Ponto de orvalho >= -25, Material seco.

Fonte: elaboração dos autores.

A alocação dos segmentos dentro do forno foi planejada de forma que se utilizasse a média de três deles como a resposta de cada experimento. Cada segmento foi colocado em diferente posição dentro do forno, respectivamente α_1 , α_2 e α_3 , seguindo-se sempre o mesmo padrão. Esta precaução foi tomada já que havia a hipótese de ocorrer descarbonetações diferentes nos espécimes, devido ao posicionamento dos mesmos (fatores não controláveis ou ruídos). As amostras usadas para a replicação de cada condição experimental foram identificadas por β_1 , β_2 e β_3 , respectivamente. As médias destas réplicas foram igualmente calculadas e usadas para encontrar a média geral de cada condição, buscando-se, com isto, reduzir o erro experimental. Os resultados da descarbonetação de cada condição experimental da matriz de Taguchi são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados obtidos da variável resposta (descarbonetação).

Experimento	Respostas								
	α_1	α_2	α_3	Médias	β_1	β_2	β_3	Médias	Media Geral
01	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	0,10	0,11	0,105
02	0,25	0,25	0,30	0,27	0,16	0,18	0,14	0,16	0,213
03	0,12	0,11	0,10	0,11	0,14	0,10	0,12	0,12	0,115
04	0,12	0,11	0,12	0,12	0,14	0,18	0,14	0,15	0,135
05	0,08	0,06	0,06	0,07	0,10	0,08	0,06	0,08	0,073
06	0,14	0,10	0,07	0,10	0,14	0,06	0,06	0,09	0,095
07	0,10	0,10	0,09	0,10	0,08	0,08	0,09	0,08	0,090
08	0,12	0,06	0,11	0,10	0,12	0,10	0,12	0,11	0,105

Fonte: elaboração dos autores.

4. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS

4.1. Influência dos fatores

Através do Método Taguchi, utilizando a matriz L_8 , foi constatado que os fatores influentes na descarbonetação são a oxidação (carepa) e ponto de orvalho, conforme mostrado na Tabela 7, cujas colunas contêm o fator, a soma dos quadrados dos efeitos (SQ), o número de graus de liberdade (GL), a soma média quadrática (SMQ) e a estatística F, razão entre SMQ e a SMQ erro.

Tabela 7 – Cálculo da análise de variância (ANOVA).

Fator (Fonte de variação)	SQ	GL	SMQ	F	Resultado
A (carepa)	0,00525	1	0,00525	6,30	Significante
B (ciclo de tratamento térmico)	0,00022	1	0,00022	0,26	
C (interação entre A e B)	0,00113	1	0,00113	1,35	
D (ponto de orvalho)	0,0034	1	0,0034	4,08	Significante
E (interação entre A e D)	0,00105	1	0,00105	1,26	
F (umidade do material)	0,00113	1	0,00113	1,35	
Erro	0,00083	1	0,00083		

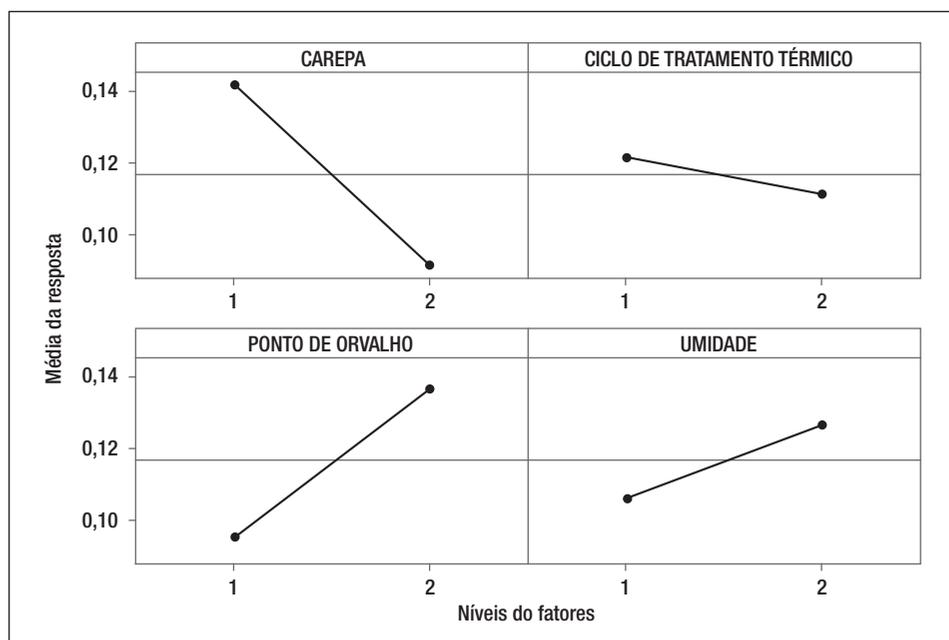
Fonte: elaboração dos autores.

Para identificar as variáveis influentes, foi utilizado o critério de $F > 2$, proposto por Phadke (1989).

4.2. Efeito dos fatores

Os ajustes que proporcionaram menor descarbonetação foram: fator A, oxidação no nível 2 (isenta de carepa); fator B, ciclo de tratamento térmico no nível 2 (ciclo Y); fator D, ponto de orvalho no nível 1 (< -35); fator F, umidade do material nível 1 (seco), veja Figura 2.

Figura 2 – Efeito dos fatores sobre a média.



Fonte: elaboração dos autores.

Não foram plotadas as interações, por não serem consideradas significantes, conforme mostrado na Tabela 7.

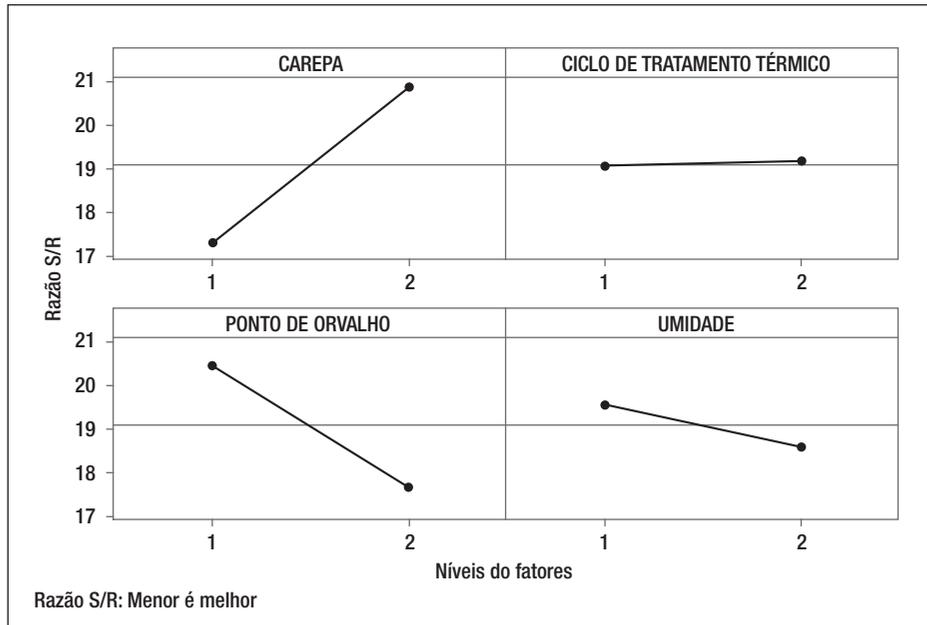
4.3. Utilização da razão (S/R)

Com o objetivo de medir a variação entre os fatores, foi calculada a razão (S/R), seguindo-se a metodologia proposta por Phadke (1989) e Souza *et al.* (2011). A relação “Menor é melhor” foi adotada neste estudo, pois se pretende, nesta pesquisa, encontrar as condições de ajuste dos fatores que venham a minimizar a profundidade de descarbonetação.

Através da razão (S/R), constatou-se que os ajustes dos fatores que proporcionam menor variação, foram: fator A, oxidação no nível 2 (isenta de carepa); fator B, ciclo de tratamento térmico no nível 2 (ciclo Y); fator D, ponto de orvalho no nível 1 (< -35); fator F, umidade do material nível 1 (seco), veja Figura 3.

A razão (S/R), segundo Phadke (1989), possui relação inversamente proporcional com a variação, ou seja, quanto maior o seu valor, menor será a variabilidade da condição experimental do processo.

Figura 3 – Efeito dos fatores sobre a razão (S/R).

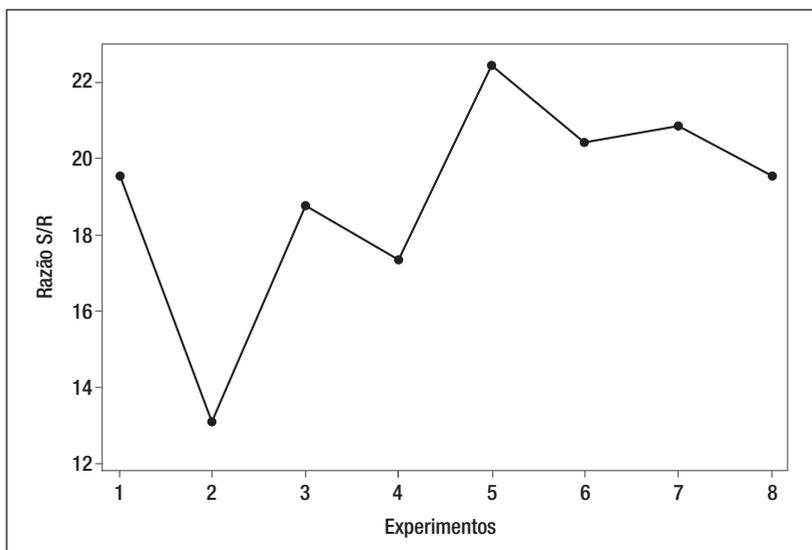


Fonte: elaboração dos autores.

4.4. Aplicação da razão (S/R) para as condições experimentais

Confirmou-se que o experimento 5, mostrado na Figura 4, possui a menor variação dentre todos os experimentos realizados, proporcionando, portanto, a melhor condição de processo, em relação à variabilidade.

Figura 4 - Variação dos experimentos sobre a razão (S/R).



Fonte: elaboração dos autores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os fatores F (umidade do material) e B (ciclo de tratamento térmico) não se mostraram influentes na condição em que foram aplicados no estudo. Quando o material úmido ingressa no forno de tratamento térmico, logo ocorre evaporação e o oxigênio liberado é removido, devido à injeção de nitrogênio. A pequena diferença entre a temperatura final dos dois ciclos (5°C) e do tempo total de tratamento (165 minutos) não afetaram significativamente a profundidade de descarbonetação.

Com os resultados obtidos, foi possível comprovar que o fator ponto de orvalho é influente e causa descarbonetação, se ajustado na condição maior que -25.

Também foi possível comprovar que o fator carepa é o maior causador da descarbonetação. Esta conclusão indicou a necessidade de rever a prática operacional, fazendo-se com que os arames de aço sejam previamente jateados ou decapados quimicamente, para a remoção da carepa antes do ciclo de tratamento térmico.

Constatou-se ser possível diminuir em mais de 50% a profundidade de descarbonetação durante a esferoidização, se o tratamento térmico for padronizado com o melhor ajuste dos fatores. A profundidade de descarbonetação no experimento 2, por exemplo, foi 0,213 mm e no experimento 5, foi 0,073 mm, veja Tabela 7.

Como os experimentos 5 e 7 têm os fatores influentes ajustados no melhor nível, ambos levam a menores profundidades de descarbonetação. Na prática, a condição de ajuste usada no experimento 5 foi incorporada à produção em massa, visto que esta combinação de fatores e níveis tem maior razão (S/R), ou seja, menor variabilidade, além de reduzir o custo de manufatura (ciclo de tratamento mais curto).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches – A reference guide, **Science Direct**, v.39, p. 483–496, 2008.

CALLISTER JR, W. D. **Uma introdução a engenharia e a ciências dos materiais**, 5ª edição, editora LTC, 2002, p.589.

CORREIA, E. A. S.; CARDOZA, J. A. S. Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método Taguchi, **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Ano 6, nº1, Jan-Mar/2011, p. 55–66.

HERNANDEZ JR, P. C.; FONSECA, J. E. F.; DICK, L. F. P. Desenvolvimento de metodologia para avaliação de aços esferoidizados. Parte 1: determinação do grau de descarbonetação, **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**; v. 6, n. 3, p. 153-157, jan.-mar. 2010.

LIMA, V. B. S.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, A. P. Otimização do desempenho de amplificadores de radiofrequência banda larga: uma abordagem experimental, **Produção**, v. 21, n. 1, p. 118-131, jan/mar, 2011.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**, 4ª edição, LTC, 2009, 514 p.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**, 3ª edição, editora Unicamp, 2007, 480 p.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**, 1st edition, New York, Prentice Hall, 1989, 333 p.

ROBIN, A.; ROSA, J. L.; SILVA, M. B. Electrodeposition and characterization of Cu–Nb composite coatings, **Surface & Coatings Technology**, v.205, p. 2152–2159, 2010.

ROSA, J. L.; ROBIN, A.; SILVA, M. B.; BALDAN, C. A.; PERES, M. P. Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach, **Journal of Materials Processing Technology**, v.209, p. 1181-1188, 2009.

ROSS, P. J. **Taguchi techniques for quality engineering**, 2nd edition, New York, McGraw-Hill Professional, 1995, 329 p.

SILVA, H. A.; SILVA, M. B. Aplicação de um projeto de experimentos (DOE) na soldagem de tubos de zircaloy-4; **Produção & Engenharia**, v. 1, n. 1, p. 41-52, set./dez. 2008.

SOUZA, H. J. C.; MOYSES, C. B.; PONTES, F. J.; DUARTE, R. N.; SILVA, C. E. S.; ALBERTO, F. L.; FERREIRA, U. R.; SILVA, M. B. Optimization Molecular assay optimized by Taguchi experimental design method for venous thromboembolism investigation, **Molecular and Cellular Probes**, v.25, p. 231-237, 2011.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Introdução à Análise Metalográfica**, Aços Villares, 1980, p.10-15.