UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANA LUIZA AMARAL BARBOZA

ESTUDO DOS EFEITOS DAS VARIÁVEIS NA QUALIDADE DAS SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

JUIZ DE FORA
2017

ANA LUIZA AMARAL BARBOZA

ESTUDO DOS EFEITOS DAS VARIÁVEIS NA QUALIDADE DAS SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Doutor em Engenharia de Produção, Roberto Malheiros Moreira Filho
Co-Orientador: Doutor em Engenharia Mecânica, Luiz Henrique Dias Alves

JUIZ DE FORA
2017

ANA LUIZA AMARAL BARBOZA

ESTUDO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS NA QUALIDADE DAS SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 23 de novembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Doutor em Engenharia de Produção, Roberto Malheiros Moreira Filho
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Brasil

Doutor em Engenharia Mecânica, Luiz Henrique Dias Alves (Co-Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Brasil

Doutor em Engenharia Mecânica, Moisés Luiz Lagares Junior
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Brasil

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Amaral Barboza, Ana Luiza.
ESTUDO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS NA QUALIDADE DAS SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS / Ana Luiza Amaral Barboza. -- 2017.
83 p.

Orientador: Roberto Malheiros Moreira Filho
Coorientador: Luiz Henrique Dias Alves
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Taguchi. 2. Soldagem. 3. Dureza. I. Malheiros Moreira Filho, Roberto, orient. II. Dias Alves, Luiz Henrique, coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Muito tenho a agradecer por ter chegado ao fim de mais uma etapa. À Deus por me dar forças quando bateram os momentos de desânimo; aos meus pais e irmã por estarem sempre presentes e preocupados comigo; ao meu namorado, por entender quando estive ausente e me apoiar, e aos demais que estiveram envolvidos em minha vida e que, com certeza de alguma forma me proporcionaram experiências novas e me ajudaram a caminhar rumo à formatura. E o tempo passou tão depressa que nem parece que 5 anos já se foram desde o Ensino Médio.

Gostaria, ainda, de agradecer aos colegas da Mais Consultoria Jr. e do Diretório Acadêmico da Faculdade de Engenharia pelos anos em que passamos juntos e aos gestores do Critt, Colégio APOGEU e Mercedes Benz Brasil pelo conhecimento que me proporcionaram.

Por último, ao professor Roberto pela orientação do presente trabalho e pela paciência, e ao professor Luiz por proporcionar que eu tivesse mais uma experiência na faculdade que foi participar do projeto Cátedra Roda-Trilho. É com muita felicidade que apresento este trabalho.

RESUMO

O Planejamento de Experimentos utilizando fatorial completo foi empregado com o intuito de investigar as condições em que o processo de soldagem de trilhos deve ocorrer para maximizar as propriedades da solda gerada, neste trabalho, maximizar a dureza das soldas de forma a evitar falhas. Os fatores estudados foram carbono equivalente, GAP e tempo de pré-aquecimento e utilizou-se a análise de variância para verificar aquele de maior influência. Foi constatado que a porcentagem de carbono equivalente e tempo de pré-aquecimento são os fatores que mais influenciam na dureza da solda, estando de acordo com o presente na literatura. O objetivo deste trabalho foi, ainda, realizar uma revisão bibliográfica da metodologia de Taguchi visto que é pouco conhecida no Brasil apesar de sua aplicabilidade em Planejamento de Experimentos nas indústrias que exigem estudos com muitos fatores e níveis. É sugerido para trabalhos futuros o uso da metodologia de Taguchi estudada para investigar o processo de soldagem em trilhos e verificação se os resultados obtidos condizem com os do fatorial completo.

Palavras-chave: Taguchi. Soldagem. Dureza.

ABSTRACT

The Design of Experiments using a full factorial was used in order to investigate the conditions in which the welding process should occur to maximize the properties of the generated weld, in this work, to maximize the weld hardness in order to avoid failures. The factors studied were carbon equivalent, GAP and preheating time, and a variance analysis was used to verify the greatest influence. It was found that the percentage of carbon equivalent and preheating time are the most important factors for weld hardness, according to reports present in the literature. The objective of this work was also to carry out a bibliographical review of the Taguchi Design because it is little known in Brazil, despite its application in Design of Experiments in industries that require studies with many factors and levels. It is suggested for future work the use of the Taguchi methodology to investigate the process of rails welding and verify the results obtained with the full factorial.

Keywords: Taguchi. Welding. Hardness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cronograma 18
Quadro 1 - Sinais Mais e Menos para o Planejamento Fatorial 2^3 24
Figura 2 - OA para estudar dois fatores 27
Figura 3 - Arranjo Ortogonal L4 28
Figura 4 - Gráfico Linear L4 29
Figura 5 - Gráfico Linear Padrão para L8 29
Figura 6 - Tabela triangular de interações 30
Figura 10 - Matriz ortogonal L27 modificado para GA 34
Figura 12 - Resultados das replicações do experimento 36
Figura 13 - Esquema representativo dos tipos de parâmetros e suas relações 37
Figura 14 - Soma de quadrados total 40
Figura 18 - Fórmula da média das razões S/N 44
Figura 19 - Média da relação sinal-ruído (S/N) para taxas de erosão média afetadas por gradiente de inclinação, intensidade de precipitação e comprimento da inclinação, respectivamente 45
Figura 20 - Média da relação sinal-ruído(S/N) para taxas de escoamento médio afetadas por gradiente de inclinação, intensidade de precipitação e comprimento da inclinação, respectivamente 45
Figura 21 - Valores de S/N e delta segundo as variáveis do experimento 46
Figura 22 - Gráfico relação Sinal- Ruído para o experimento 50
Figura 23 - Elementos básicos da via permanente 53
Figura 24 - Elementos do trilho Vignole 53
Figura 25 - Equação química soldagem aluminotérmica 54
Figura 26 - Etapas da soldagem aluminotérmica 55
Figura 27 - Distribuição das quebras de trilhos por posição 56
Figura 28 - Tipos de defeitos em soldas 57
Figura 29 - Defeitos de soldas aluminotérmicas e recorrência 57
Quadro 2 - Níveis dos fatores escolhidos para investigação 60
Quadro 3 - Fatorial completo empregado nos experimentos 60
Figura 31 - Cronograma dos experimentos feitos no segundo momento 62
Figura 32 - Ensaio de dureza- Gráficos de dureza para as soldas S01, S02, S03 e S04 65
Figura 33 - Ensaio de dureza- Gráficos de dureza para as soldas S12, S09, S11 e S14 66

Figura 34 - Resultado das medições para os menores pontos de dureza e maiores larguras do dente das soldas 66
Esquema 1 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento, GAP e carbono equivalente para Menor Ponto de Dureza 67
Esquema 2 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento, GAP e carbono equivalente para Maior Largura do Dente 68
Esquema 3 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento, GAP e carbono equivalente para Menor Ponto de Dureza sem interação de três fatores. 69
Esquema 4 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento, GAP e carbono equivalente para Maior Largura do Dente sem interação de três fatores. 69
Esquema 5 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente para Menor Ponto de Dureza com interação entre eles. 71
Esquema 6 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente para Maior Largura do Dente com interação entre eles. 71
Esquema 7 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente para Menor Ponto de Dureza sem interação entre eles. 72
Esquema 8 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente para Maior Largura do Dente sem interação entre eles. 73
Figura 35 - Relação entre a variável resposta Menor Ponto de Dureza e seus fatores de influência.. 74
Figura 36 - Relação entre a variável resposta Maior Largura do Dente e seus fatores de influência 75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

AL- Elemento químico alumínio

Al2O3- Óxido de Alumínio

Fe- Elemento químico ferro

Fe2O3- Óxido de Ferro

KJ- Unidade de medida de energia térmica (calor)

MS- Média dos quadrados

MSE- Média dos quadrados devida ao erro

OA- Arranjo ortogonal

SNR- Razão Sinal-Ruído

SS- Soma dos quadrados

UFJF- Universidade Federal de Juiz de Fora

ZAC- Zona afetada pelo calor

GAP- do inglês, significa distanciamento, afastamento, separação, uma lacuna ou um vácuo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **12**
1.1 Considerações Iniciais **13**
1.2 Justificativa **14**
1.3 Escopo Do Trabalho **14**
1.4 Elaboração Dos Objetivos **15**
1.4.1 Objetivo Geral *15*
1.4.2 Objetivos Específicos *15*
1.5 Definição Da Metodologia **16**
1.6 Estrutura Do Trabalho **16**
1.7 Cronograma **18**
2 REVISÃO DE LITERATURA **19**
2.1 Planejamento De Experimentos **21**
2.1.1 Experimentos Fatoriais *22*
2.2 Taguchi Design **26**
2.2.1 Arranjos Ortogonais *27*
2.2.2 Gráficos Lineares *28*
2.2.3 Resolução do Design *32*
2.2.4 Graus de Liberdade *32*
2.2.5 Repetição, replicação e randomização *34*
2.2.6 Classificação dos Fatores *36*
2.2.7 Escolha das características de qualidade para experimentos industriais *38*
2.2.8 Considerações de Metrologia para Experimentação Industrial *38*
2.2.9 ANOVA *39*
2.2.10 Relação Sinal-Ruído (Signal-to-noise ratio ou SNR) *43*
2.2.11 Passos para implantação de Taguchi *46*
2.2.12 Exemplos de emprego da metodologia de Taguchi *48*
2.3 Transporte Ferroviário **51**
2.3.1 Trilhos *52*
2.3.2 Soldagem Aluminotérmica *53*
2.3.3 Fraturas em Soldas Aluminotérmicas *55*
2.3.4 Defeitos em Soldas Aluminotérmicas *56*

3 APLICAÇÃO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA 58
3.1 Visão geral do produto ou processo 58
3.2 Identificação do problema, formulação e classificação 58
3.3 Identificação dos parâmetros de processo (fatores) e interações de interesse 59
3.4 Selecionar níveis e alcance do fator 59
3.5 escolher o arranjo ortogonal 60
3.6 Preparação para o experimento e operação 61
4 RESULTADOS 63
4.1 Resultados Obtidos Para Dureza 63
4.2 Análise Dos Resultados Obtidos 66
5 CONCLUSÃO 76
6 REFERÊNCIAS 77
ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE 82

1 INTRODUÇÃO

Esse estudo é parte do projeto denominado Cátedra Roda- Trilho que, desde 2014, a Vale vem desenvolvendo em parceria com a Universidade Federal de São Paulo (USP). A Universidade Federal de Juiz de Fora começou a fazer parte desse projeto em maio de 2016.

O Projeto em questão, fruto da parceria entre a Universidade Federal de Juiz de Fora e a empresa Vale S.A tem por objetivo estudar os processos de soldagem de trilhos empregados para o Heavy Haul e fazer a caracterização completa das juntas soldadas para os diversos tipos de trilhos empregados pela Vale S.A. Por fim, serão elaborados modelos para prever os níveis que as variáveis devem assumir para que as propriedades da solda sejam otimizadas.

Existem dois processos de soldagem empregados pela Vale S.A.: o centelhamento e a aluminotermia. O presente trabalho tem por objetivo o uso de planejamento de experimentos por fatorial completo para investigação dos níveis mais adequados para as variáveis envolvidas no processo de confecção de soldas aluminotérmicas – também conhecidas como solda Thermite ou Thermit® de modo que as soldas sejam menos propícias a falhas.

Segundo Rosa (2008) a soldagem aluminotérmica possui aplicação específica onde outros processos não apresentam necessária flexibilidade para a realização em campo. Devido à sua relativa simplicidade e independência de fontes externas de energia, a aluminotermia se consagrou como um dos métodos mais empregados na soldagem de trilhos ferroviários na via férrea. No entanto, segundo Lawrence (2014), 40% de todas as falhas de serviço são devidas a soldas aluminotérmicas e 10% de todos os descarrilamentos são devido a essas soldas que quebraram, justificando a importância do monitoramento desse processo de soldagem.

As análises bibliográficas abrangeram a metodologia de Taguchi. Segundo Antony e Kaye (2000), no início de 1950, Dr Genich Taguchi “o pai da Engenharia de Qualidade” introduziu o conceito de “fora de linha” e “em linha” técnicas de controle de qualidade conhecidas como métodos de Taguchi. Seus métodos de projeto experimental foram introduzidos nos Estados Unidos no início dos anos 1980. Em 1980, a introdução do método para várias grandes empresas americanas, incluindo AT&T, Ford e Xerox resultaram em significante melhoria da qualidade em design de produtos e processos. Embora não difundida no Brasil, tal metodologia trata-se de um exemplo de experimento fatorial fracionado que torna-se mais viável para aplicação na indústria, visto que o custo de se empregar fatoriais completos pode ser exorbitantemente caro em alguns casos. Adicionado a isso, a metodologia disponibiliza algumas ferramentas facilitadoras e conceitos para aproximar a parte teórica da estatística experimental da realidade dos engenheiros.

O estabelecimento e entendimento da relação entre variação de parâmetros de soldagem com as alterações metalúrgicas e mecânicas de uniões soldadas de trilhos, oferecem condições para tomada de decisões que visem a qualidade da solda e a otimização do processo de soldagem. Além disso, embora o presente estudo faça análises utilizando o Fatorial Completo, a revisão bibliográfica terá uma contribuição acadêmica forte, vista a pouca literatura existente sobre o tema e a possibilidade de se obter estudo mais direcionado com o emprego de ferramentas estatísticas adequadas como o Taguchi Design.

1.1 Considerações Iniciais

Esse trabalho é um dos produtos da parceria formada entre a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e a empresa Vale S.A que integrou o projeto Cátedra-Roda-Trilho, já firmado entre a empresa Vale S.A. e a Universidade de São Paulo. Os focos do projeto Cátedra Roda Trilho estão na criação de conhecimento e na formação de pessoas, no melhor entendimento dos processos empregados e dos materiais envolvidos no tribossistema roda-trilho, no desenvolvimento de novos materiais e desenvolvimento de novos processos, na gestão da manutenção e controle dos ativos e na segurança operacional.

A proposta é o levantamento das variáveis mais significantes no processo de soldagem aluminotérmica empregado atualmente e realização de experimentação para averiguar o impacto (positivo ou negativo) que as variáveis, em determinados níveis, apresentam sobre as soldas geradas. Em seguida, serão feitas análises das soldas nos laboratórios da UFJF e, posteriormente, tiradas as conclusões a respeito dos níveis que as principais variáveis devem assumir para se obter as propriedades desejadas. Para a execução dos experimentos será adotada a metodologia de Fatorial Completo, vista sua exatidão e facilidade no estudo de poucos fatores e níveis.

Os insumos e equipamentos para realização do projeto foram provenientes da empresa Vale S.A. e os experimentos foram realizados na área do Estaleiro de Soldas da Estrada de Ferro Carajás-EFC, em São Luiz/MA, em 2016. Os experimentos foram realizados pelas equipes dos estaleiros de solda e da manutenção de via do Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira-TFPM com o monitoramento da equipe da UFJF responsável.

1.2 Justificativa

O projeto se mostra relevante pelos seguintes pontos:

- Em parceria com a Vale S.A., tem uma importância técnica significativa uma vez que o estudo do processo de soldagem e seus resultados gerarão insumos para a empresa aprimorar seu processo e, consequentemente, poder minimizar riscos de falhas e gerar diminuição de custos. O modelo facilitará o controle da Vale sobre as variáveis de interesse no processo de soldagem.
- Como faz parte de uma parceria entre Universidade e empresa, assim como difunde o próprio projeto Cátedra Roda-Trilho, esse trabalho foi uma das entregas que possibilitou o desenvolvimento dos alunos e professores envolvidos, além de ser fruto do conhecimento expandido sobre o sistema roda-trilho nas Universidades. Até mesmo a equipe Vale ampliará o entendimento do processo de soldagem e terá acesso a meios de fazê-lo de maneira otimizada.
- O estudo aprofundado da metodologia de Taguchi que, embora apresente ótimos resultados na literatura existente, ainda não apresenta muita bibliografia (publicações relevantes em grande número) no Brasil, servirá como base para projetos futuros que desejem aplicar a metodologia e melhorar qualidade de produtos e/ou processos.

1.3 Escopo Do Trabalho

O presente estudo teve como suporte os experimentos realizados em trilhos da empresa Vale S.A. da área do Estaleiro de Soldas da Estrada de Ferro de Carajás-EFC, em São Luís/MA, no final de 2016. A experimentação foi feita em campo e as soldas escolhidas para o estudo foram as obtidas através do processo de soldagem aluminotérmica. Foram utilizados os kits de solda (insumos e equipamentos) e trilhos já empregados pela Vale. Os procedimentos de execução, bem como os profissionais envolvidos também seguiram os padrões já empregados pela empresa, contando com o apoio da equipe do projeto da UFJF. As soldas coletadas nessa região foram adotadas como modelo (padrão) para que as conclusões acerca das variáveis mais significativas ao bom desempenho da solda aluminotérmica fossem investigadas. Foram realizadas duas réplicas para análise de cada condição experimental, com o intuito de minimizar o erro da experimentação.

Paralelo a isso, foi realizado um brainstorming entre as equipes (UFJF e Vale S.A.) com o intuito de levantar as variáveis mais significativas ao desempenho das soldas aluminotérmicas e, por consequência, as variáveis que deveriam ser investigadas. Por fim, foram consideradas três variáveis, cada uma operando em dois níveis distintos. Essas foram analisadas, em 2017, com o intuito de serem verificados os níveis em que deveriam operar para maximizar as propriedades das soldas a fim de evitar quebras e/ou falhas nas mesmas. Os fatores de ruído, ou seja, os quais não podem ter seus níveis controlados, não foram analisados pelo modelo.
As propriedades das soldas adquiridas com o experimento foram analisadas nos laboratórios da UFJF e, estaticamente, levando-se em consideração o Fatorial Completo. Essa metodologia foi considerada essencial visto o tempo para desenvolvimento do projeto e a quantidade de fatores (3) e níveis (2) trabalhados, não sendo necessária a abdicação de algumas variáveis que poderiam ser importantes ao processo. Com o suporte da Análise de Variância (ANOVA), conseguiu-se verificar os níveis que as variáveis escolhidas deveriam operar.

1.4 Elaboração Dos Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Empregar o Planejamento de Experimentos Fatorial Completo para investigar os níveis em que as principais variáveis empregadas no processo da solda Thermite devem operar para gerar soldas com propriedades tais que minimizem riscos de defeitos e falhas nas vias férreas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudar processo de soldagem aluminotérmica empregado pela Vale S.A;
- Levantar as variáveis críticas para o processo de soldagem e os níveis críticos em que podem operar;
- Estudar metodologia de Taguchi para aplicação em trabalhos futuros.

1.5 Definição Da Metodologia

O trabalho teve como primeira etapa a Revisão Bibliográfica. Nela, os conceitos e considerações importantes sobre Planejamento de Experimentos Fatorial Completo e sobre a metodologia de Taguchi foram levantados, a aplicação desses pelos diferentes ramos da indústria e a constatação de sua eficácia. O intuito foi verificar e investigar as metodologias para escolher a mais adequada para aplicação no processo de soldagem aluminotérmica da empresa Vale S.A. Também buscou-se entender melhor esse processo de soldagem para verificar as principais variáveis que influenciam em seu desempenho.

Em paralelo, foram realizadas reuniões entre a equipe da UFJF e a Vale S.A., utilizando técnicas de brainstorming e incluindo profissionais de diferentes visões, para definir as variáveis a serem analisadas no modelo. Em complemento, a experimentação em campo e coletas de amostras foi executada com base na metodologia de planejamento de experimentos e seguindo o roteiro elaborado entre as equipes (com as etapas a serem seguidas, níveis de variáveis a serem trabalhados, réplicas, número de operadores, horário de operação, etc).

Numa segunda fase, análises das amostras de soldas foram feitas em laboratórios da UFJF. Os resultados obtidos foram estudados via fatorial completo que revelou o efeito da variação dos níveis dos fatores escolhidos na qualidade das soldas obtidas e gerou a combinação de níveis que possibilitam o alcance de melhores propriedades às soldas. O número de experimentos a serem realizados e interações foram obtidos utilizando-se o Fatorial Completo, e a análise de variância e percentual de contribuição pelas tabelas ANOVA.

1.6 Estrutura Do Trabalho

No capítulo 1, é apresentado um panorama geral do trabalho, relatando o que será abordado, sua relevância, seu objetivo, dentre outros aspectos essenciais ao entendimento do estudo feito e aqui reunido.

O capítulo 2, Revisão Bibliográfica, reúne todo o conhecimento encontrado acerca da proposta do Trabalho, através de livros e artigos que relataram a metodologia de Planejamento de Experimentos e/ou usaram o processo de soldagem aluminotérmica. Inicia-se com a explicação da evolução do conceito de qualidade ao longo dos anos e afirma a importância de se garantir processos com qualidade na indústria, além de conter exemplos

concretos de empresas que empregaram a metodologia de Taguchi. Esse capítulo é dividido em 3 subcapítulos.

O primeiro dos subcapítulos, intitulado “Planejamento de experimentos” tem o intuito de explicar do que se trata esse conceito e engloba também conceitos de experimentação fatorial- tanto completa como fracionada- como introdução à metodologia de Taguchi.

O segundo subcapítulo, “Taguchi Design”, apresenta um estudo sobre a metodologia, com exemplo de empresas que a aplicaram e como o fizeram. Apresenta tópicos em que são descritas as ferramentas utilizadas pela metodologia para orientarem engenheiros a atingirem robustez em seus processos e conceitos que devem ser compreendidos para implantação desse método. São abordadas ferramentas como arranjos e gráficos ortogonais, relação sinal ruído, ANOVA e conceitos de metrologia, resolução do design, graus de liberdade, dentre outros. Esse subcapítulo serve de revisão dessa metodologia ainda pouco difundida no Brasil, porém, que pode ser aplicada com eficácia em planejamento de experimentos industriais.

O terceiro subcapítulo, por sua vez, “Transporte Ferroviário”, começa com a apresentação desse modal de transporte e aborda conceitos básicos sobre o que são trilhos, sua composição química e adentra na parte de interesse do projeto que é a descrição do processo de soldagem aluminotérmica e os defeitos a que está sujeito.

O capítulo 3 apresenta a aplicação do Fatorial Completo para investigar o processo de soldagem aluminotérmica na Vale S.A., e contém vários subcapítulos que descrevem algumas etapas necessárias à experimentação, inspirando-se em alguns conceitos de Taguchi. Dentre elas, a seleção de variáveis e fatores de interesse; a identificação do problema e método de medição; a preparação para a experimentação, dentre outros.

O capítulo 4 revela os resultados obtidos através da Análise de Variância (ANOVA) para a variável resposta escolhida: a Dureza. Nele são revelados os fatores principais e níveis que tem maior influência na dureza das soldas obtidas pelos experimentos. São feitas, ainda, análises acerca dos resultados encontrados.

Por último, o capítulo 5 traz a conclusão acerca dos resultados obtidos com o presente trabalho, bem como sugestão o uso da metodologia de Taguchi para investigar outras variáveis resposta do processo de soldagem para validação da metodologia.

1.7 Cronograma

O cronograma a seguir, elaborado pela autora, mostra as atividades macro que foram realizadas no decorrer do projeto:

Figura 1 - Cronograma

Atividades 2017	JUL	AGO		SET		OUT		NOV		DEZ	
Revisão Bibliográfica											
Chegada das amostras											
Análise da dureza em laboratório											
Análise dos resultados de dureza obtidos											
Análise estatística dos experimentos											
Conclusões experimentais											
Apresentação TCC											

Fonte: a autora

2 REVISÃO DE LITERATURA

A acirrada competição no mercado global de produtos industriais tem exigido das empresas preocupação cada vez maior com os aspectos da qualidade e da redução de custos. Essa preocupação tem levado engenheiros e cientistas a buscarem aprimoramento em seus instrumentos estatísticos para planejamento, medida e controle da qualidade industrial (FIOD NETO, 1997).

Segundo Jtec/Wtec (1995) e Vieira (1996) citado por Fiod Neto (1997) nos anos 1920, predominava nas empresas a inspeção do produto acabado, sendo que os produtos considerados ruins eram retrabalhados ou descartados. Caso a empresa não tivesse seus processos de produção muito bem especificados, seus custos com desperdício seriam muito grandes. Com o desenvolvimento do Controle Estatístico do Processo, a inspeção da qualidade do produto estendeu-se para toda a linha de produção. Dessa forma, caso a inspeção identificasse anomalias no produto em uma etapa da linha, já eram feitos os reparos necessários para que o erro não se propagasse. Em conjunto, a formulação de ações para evitar a recorrência do problema também ocorria.

A época seguinte do controle de qualidade industrial caracterizou-se pela atividade experimental, na busca de conhecer as variáveis e variantes que influenciam a qualidade e o custo do produto, antes mesmo do produto ser encaminhado para fabricação. (FIOD NETO, 1997)

Segundo Fiod Neto (1997), na fase seguinte, Melhoria da Qualidade, objetivava-se prever possíveis falhas e melhorar a eficiência da produção. As estatísticas experimentais auxiliaram o processo. Buscava-se conhecer a origem e causa dos erros para se conseguir, posteriormente, minimizá-los. Além disso, o conceito da qualidade se expande para além da linha de produção, e o entendimento de que condições de trabalho (ruídos, poeira, funcionários) também influenciam na qualidade do produto, começa a se propagar.

Fiod Neto (1997) relatou que os métodos de Taguchi pertencem à classe de modelos que buscam assegurar qualidade através do projeto, identificando e controlando as variáveis críticas- denominadas ruídos- causadoras de desvios na qualidade do processo e/ou produto. Esses métodos apresentam-se como uma nova filosofia para o controle da qualidade e diminuição dos custos: a qualidade é medida pelo desvio que possui do valor estabelecido, sendo que os ruídos (temperatura, umidade, poeira, deterioração) causam tais desvios e resultam em perda de qualidade. Esse fato pode levar a grandes danos para a empresa, medidos através da função perda de Taguchi: em vez de remover os ruídos, o que pode ser de

difícil execução ou pode encarecer o processo produtivo, os métodos de Taguchi ambicionam remover os efeitos negativos gerados pelos ruídos.

Vários autores empregaram a metodologia de Taguchi e obtiveram resultados significativos. Alguns exemplos são descritos abaixo:

A influência de condições de sinterização de cerâmicas de alta temperatura na rugosidade da superfície, densidade e encolhimento das amostras sinterizadas foi apresentada no trabalho de Jurkówa e Stiernstedt (2014). As investigações foram conduzidas usando Experimentos de Taguchi. Os fatores investigados foram a influência da temperatura de pico da fumaça, o tempo de permanência na temperatura de pico e o tempo de subida para a temperatura de corte máxima, que afetavam a rugosidade da superfície, densidade e encolhimento de fitas de alumina à base de água. Os resultados obtidos sugerem que o método de Taguchi pode ser usado para prever a influência das condições do processo e estimar as condições de sinterização ótimas.

Para a obtenção de esmaltes com características adequadas à sua aplicação, é necessário definir, além da composição da frita base, a formulação da suspensão de esmalte e as condições de aplicação e queima. A influência de fatores como os aditivos utilizados e a temperatura de queima sobre as características do esmalte são muitas vezes desconhecidos. Foi analisada a influência de parâmetros da formulação do esmalte e temperatura de queima sobre as características de porosidade e dureza da superfície obtida. A utilização de um arranjo ortogonal de Taguchi auxiliou na escolha dos fatores e parâmetros dos testes de aplicação, definiu a sequência de experimentos realizados e as propriedades medidas. As características avaliadas foram: a porosidade, a dureza ao risco, a dureza Mohs, a dureza Vickers e as características visuais. Após a realização dos experimentos foi possível identificar a formulação e os parâmetros que conferiram os melhores resultados quanto à aplicação pretendida para o esmalte (LIRA e ALARCON 2004)

O método de Taguchi é muito conhecido no setor industrial de manufatura onde é usado para controle de qualidade. Toto (2001), no entanto, empregou o método no Instituto de Saúde como ferramenta para quantificar e hierarquizar problemas gerenciais. Foram realizadas entrevistas com o diretor-geral, gerente de informática, um cientista, gerente de planejamento e gerente de pessoal para seleção dos fatores: planejamento estratégico, desenvolvimento gerencial, incentivo à eficiência, critérios de promoção, sistema de informação, remuneração e educação continuada. Esses fatores foram organizados em uma matriz ortogonal que possibilitou quantificar a insatisfação quanto aos problemas gerenciais e hierarquizá-los para posterior resolução. Toto (2001) concluiu que o Método de Taguchi pode ser bastante útil nas

organizações principalmente quando se quer realizar experimentações com muitas variáveis e todas parecerem igualmente importantes e prioritárias. Esse método é útil para reduzir o número de fatores e hierarquizá-los segundo a importância para organização em questão.

2.1 Planejamento De Experimentos

Segundo Antony e Kaye (2000) para definir o termo DOE (Design of Experiments) ou Planejamento de Experimentos, em português, é importante saber a função da experimentação, em geral, nas empresas de manufatura. De acordo com o dicionário Webster's, experimento é definido como uma operação executada sobre condições controladas com objetivo de descobrir um efeito desconhecido, estabilizar uma hipótese ou ilustrar uma lei conhecida. Cientistas e engenheiros executam experimentos para entender mais sobre um fenômeno, investigar a relação de causa e efeito e descobrir as relações entre as variáveis. No geral, os experimentos são conduzidos para melhorar a qualidade de um produto ou processo, para conhecer, estimar ou confirmar.

Experimentos são uma parte natural dos processos de tomada de decisão em engenharia e em ciência. O uso de planejamento de experimentos no projeto de engenharia pode resultar em produtos que sejam fáceis de fabricar, em produtos que tenham melhor desempenho no campo e melhor confiabilidade do que seus competidores, e em produtos que possam ser projetados, desenvolvidos e produzidos em menos tempo. (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).

Bitondo et al (2010) utilizaram um experimento em ligas de alumínio que são soldadas por fricção utilizando duas variáveis independentes fundamentais para o processo: velocidade de rotação e de soldagem. Foram realizados modelos empíricos para investigar, a partir das variáveis, as forças de forjamento e rendimento e resistência à tração com objetivo de, a partir das condições ótimas das variáveis, obter o maior rendimento e resistência à tração simultaneamente.

Planejamento de Experimentos ou Design os Experiments (DOE do inglês), segundo Antony e Kaye (2000) é uma abordagem científica que permite ao experimentador entender um processo e para determinar como as variáveis de entrada (inputs, fatores) afetam as saídas (outputs ou características de qualidade). Em outras palavras, é uma abordagem sistemática para otimização de processos.

Ainda segundo esses autores, o planejamento de experimentos pode ser usado para:

- Estudar o efeito de vários fatores no comportamento do produto ou processo;

- Entender a relação entre as variáveis de entrada e características de qualidade na saída;
- Reduzir tempo de desenvolvimento do produto ou processo;
- Identificar as configurações ótimas de um processo as quais maximizam ou minimizam a resposta;
- Reduzir os custos de manufatura;
- Melhorar a confiabilidade dos produtos;
- Reduzir variabilidade no desempenho funcional do produto.

A Vantagem dessa abordagem é que se consegue variar diferentes fatores simultaneamente em seus respectivos níveis para determinar o efeito de cada fator na resposta, apresentando ganhos em relação às abordagens fator a fator, em que cada fator é variado por vez, enquanto os demais permanecem constantes.

2.1.1 Experimentos Fatoriais

Quando vários fatores são de interesse em um experimento, um experimento fatorial deve ser usado. Por um experimento fatorial, queremos dizer que em cada tentativa completa ou réplica do experimento todas as combinações possíveis dos fatores são investigadas. Assim, se houver dois fatores A e B, com “a” níveis do fator A e “b” níveis do fator B, cada réplica conterá todas as “ab” combinações de tratamentos (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).

Fator refere-se a uma variável controlável ou incontrolável a qual a influência sobre uma resposta (ou saída) é estudada durante o experimento. Um fator pode ser qualitativo (diferentes detergentes, máquinas, fornecedores, catalisadores e assim por diante) ou quantitativo (pressão, tempo, temperatura, velocidade, dentre outros). (ANTONY E KAYE, 2000).

Nível é um valor especificado ou configuração do fator a ser examinado no experimento. Por exemplo, se o experimento for realizado a três velocidades diferentes, podemos dizer que o fator velocidade tem três níveis. (ANTONY E KAYE, 2000).

O efeito de um fator é definido como a variação na resposta produzida pela mudança no nível do fator. Ele é chamado de um efeito principal quando se refere a fatores primários no estudo (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).

Em alguns experimentos, a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a mesma em todos os níveis dos outros fatores. Quando isso ocorre, há uma interação entre os fatores. (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).

Experimentos fatoriais podem ser de dois tipos: Fatoriais completos e experimentos fatoriais fracionados. O Experimento Fatorial Completo permite experimentadores estudarem todas as combinações possíveis de fatores em seus respectivos níveis. (ANTONY E KAYE, 2000).

O experimentador é capaz de variar todos os fatores simultaneamente e, dessa forma, consegue avaliar as interações entre os fatores estudados. O Experimento Fatorial Completo pode ser denotado por l^k em que l é o número de níveis do fator e k é o número de fatores a serem estudados no experimento. Por exemplo, se um experimento pode ser escrito na forma 2^3, significa que apresenta 3 fatores a serem investigados, cada qual com 2 níveis.

Devido ao grande número de ensaios exigidos, o delineamento fatorial completo tende a não ser utilizado em um experimento inicial, a não ser que haja poucos fatores potenciais importantes para serem estudados (FIOD NETO, 1997).

Segundo Antony e Kaye (2000) o custo de execução de experimentos fatoriais completos é exorbitantemente caro. É uma boa prática executar um Experimento Fatorial Completo quando o número de fatores é menor ou igual a 4. Caso contrário, os Experimentos Fatoriais Fracionados são recomendados e podem ser usados efetivamente.

Esse modelo de experimentos pode ser denotado por l^(k-p), em que 1/(l^p) é a fração do Fatorial Completo l^k. Por exemplo, 2^(6-2) indica que um experimentador deseja estudar 6 fatores em apenas 16 ensaios experimentais, mantendo todos os fatores em 2 níveis. Seriam necessárias 64 corridas para estudar 6 fatores em 2 níveis se o experimentador tivesse escolhido um Fatorial Completo. Por conta do tempo limitado e recursos experimentais, o experimentador escolheu um quarto do fatorial completo 2^6, sacrificando informações das interações entre alguns fatores. (ANTONY E KAYE, 2000).

Segundo Montgomery e Runger (2009) uma meia-fração do planejamento 2^k contem 2^(k-1) corridas. Como exemplo, considere-se um planejamento 2^2, uma meia fração de 2^3. A tabela de sinais mais e menos para o planejamento 2^3 é ilustrada no quadro 1.

Quadro 1 - Sinais Mais e Menos para o Planejamento Fatorial 2^3

Combinação de tratamentos	**Efeito Fatorial**							
	I	*A*	*B*	*C*	*AB*	*AC*	*BC*	*ABC*
A	+	+	-	-	-	-	+	+
B	+	-	+	-	-	+	-	+
Abc	+	-	-	+	+	-	-	+
Ab	+	+	+	-	+	-	-	-
Ac	+	+	-	+	-	+	-	-
Bc	+	-	+	+	-	-	+	-
-1	+	-	-	-	+	+	+	-

Fonte: a autora

Seleciona-se quatro combinações de tratamento, a, b, c e abc como meia fração (parte superior da tabela). O 2^(3-1) é formado selecionando as combinações de tratamentos que resultam em sinal positivo para o efeito ABC. Assim, ABC é denominado gerador da fração 2^(3-1). O elemento identidade I também tem sinal positivo para as corridas, assim I=ABC é conhecido como relação de definição para o planejamento. Da parte superior da tabela, obtemos as estimativas dos efeitos principais e interações de segunda ordem como combinações lineares das observações.

A=1/2 [a- b- c+ abc]

B=1/2[-a+ b -c+ abc]

C=1/2 [-a- b+ c+ abc]

BC=1/2[a- b- c+ abc]

AC=1/2[-a+ b- c+ abc]

AB=1/2[-a -b+ c+ abc]

A combinação linear das observações na coluna A, “la” estima tanto o efeito de A como da interação BC. Ou seja, a combinação linear “la” estima a soma desses dois efeitos A+BC. Dois ou mais efeitos que tenham essa propriedade são chamados de pares associados (aliases). No planejamento mostrado, A e BC são pares associados, B e AC são pares associados e C e AB também. Em situações práticas, é possível selecionar a fração de forma que os efeitos principais e interações de ordem baixa de interesse sejam associados com interações de ordem alta (que podem ser consideradas negligenciáveis).

A estrutura associada para esse planejamento é encontrada usando a definição de relação I=ABC. A multiplicação de qualquer efeito pela relação de definição I=ABC resulta nos pares associados para esse efeito. Supondo par associado A.

$A=A \cdot ABC=A^2BC=BC$, considerando $A. I=A$ e $A^2 =I$.

Os pares associados de B e C são:

$B=B. ABC=AB^2C= AC$
$C=C. ABC=ABC^2=AB$

Caso a outra meia-fração da tabela fosse adotada, as mesmas conclusões seriam obtidas.
Por não abranger todos os experimentos possíveis, a abordagem de experimentos fatoriais deve andar juntamente com o conhecimento de engenharia, de forma que sejam estudados os efeitos de fatores principais e das interações realmente importantes para se chegar ao resultado pretendido.
Zhang, Wang e Yang (2014) relataram que fatoriais completos são utilizados para estudos de erosão do solo, porém muitas vezes são difíceis de conduzir devido ao grande número de fatores e níveis a se considerar. Segundo os autores, estudos de Taguchi sobre erosão do solo são escassos apesar de essa ser uma ferramenta estatística simples, econômica e eficiente que usa apenas uma fração dos experimentos para obter resultados do estudo. Assim, fizeram uma comparação das duas metodologias com as variáveis comprimentos de inclinação, gradientes de inclinação e intensidades de chuva, cada uma com 5 níveis. No fatorial completo utilizando 125 ensaios experimentais (5^3) e, para Taguchi, um L25 (25 ensaios experimentais). Os parâmetros estatísticos para a erosão do estado quase estável, as taxas de escoamento de cada teste, as condições ótimas para a produção de erosão máxima e de escoamento, o efeito principal e a contribuição percentual de cada fator foram comparados para o fatorial completo e Taguchi. Segundo Zhang, Wang e Yang (2014) os projetos geraram resultados quase idênticos. Utilizando os dados experimentais do projeto Taguchi, foi possível prever com precisão as taxas de erosão e escoamento sob as condições que foram excluídas do projeto Taguchi. Todos os resultados obtidos com a análise dos dados experimentais para ambos os projetos indicaram que o projeto de Taguchi poderia ser aplicado para estudos de erosão e poderia substituir os projetos fatoriais completos. Isso economizaria tempo, trabalho e custos através da redução do número de testes a serem realizados.

2.2 Taguchi Design

No início de 1950, Dr Genich Taguchi “o pai da Engenharia de Qualidade” introduziu o conceito de “fora de linha” e “em linha” técnicas de controle de qualidade conhecidas como métodos de Taguchi (ANTONY E KAYE, 2000).

O método de Taguchi pertence à categoria dos métodos que, em Qualidade, são classificados de “fora-de-linha” (off-line) por serem de utilização exterior à linha de produção, em oposição aos métodos “em- linha” (on-line) que, sendo os mais frequentemente utilizados, executam o controle durante a fase produtiva. Mais concretamente, o método de Taguchi pode intervir desde a fase de desenho (concepção) do produto, ou seja, antes da fabricação propriamente dita. (CASTRO, 1999).

Ainda segundo Castro (1999) o objetivo do método é minimizar a variabilidade do produto, identificando os meios de lhe conferir robustez, durante o processo de fabricação, perante as fontes de variação a que ele é submetido.

Taguchi desenvolveu tanto uma filosofia como uma metodologia para o processo de melhoria da qualidade, que dependia fortemente de conceitos e ferramentas estatísticas, especialmente experimentos. Seu método enfatiza a importância de usar o projeto experimental nas quatro áreas seguintes:

- Fazer produtos e manufaturar processos insensíveis a variações dos componentes;
- Fazer produtos e processos insensíveis a variações de fabricação e ambientais;
- Minimizar variação em torno de um valor alvo da resposta;
- Teste de vida de produtos.

O delineamento proposto nos métodos de Taguchi é um delineamento do modelo fatorial fracionado, ao qual são acrescentados alguns instrumentos facilitadores com os quais Taguchi consegue fazer com que essa parte da teoria estatística experimental mais se aproxime do cotidiano dos engenheiros, sem impressioná-los com jargões de estatística. Na classe de instrumentos facilitadores que Taguchi desenvolveu, estão os chamados gráficos lineares e as tabelas ortogonais. (FIOD NETO, 1997)

2.2.1 Arranjos Ortogonais

Da redução do conjunto de experiências, resulta inevitavelmente alguma redução na informação que é possível retirar do estudo. Uma das consequências mais indesejáveis é que os efeitos de alguns fatores se apresentarão confundidos com os efeitos de algumas interações entre fatores. Para contornar esse inconveniente, Taguchi sugere que a afetação dos fatores às condições do desenho seja realizada com auxílio de gráficos lineares ou tabelas de interações. (CASTRO, 1999)

Arranjos Ortogonais são ferramentas simples e usuais para planejar experimentos industriais. Taguchi considera a habilidade de identificar presença de interações entre fatores a primeira razão para serem utilizados. Um arranjo ortogonal (orthogonal array, OA, em inglês) é uma matriz de números arranjada em linhas e colunas. Cada linha representa os níveis (ou estados) dos fatores selecionados em um dado experimento e cada coluna representa um específico fator cujos efeitos na saída (ou resposta) são de interesse dos experimentos. (ANTONY E KAYE, 2000).

Segundo Antony e Kaye (2000), com ortogonalidade permite se estimar os efeitos de cada fator independente de outros. Por exemplo, um OA com quatro experimentos pode ser usado para estudar dois fatores, chamados de A e B, cada um desses fatores mantido em dois níveis. Há quatro combinações de níveis de fatores para A e B, representados: A1B1, A1B2, A2B1 E A2B2. A figura 2 ilustra o OA para estudar dois fatores em dois níveis.

Figura 2 - OA para estudar dois fatores

Trial number	*Factor A*	*Factor B*
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Fonte: Antony; Kaye (2000)

Um arranjo ortogonal é usualmente representado por La (b^c), em que a é o número de ensaios experimentais necessários ao experimento; b é o número de níveis de cada fator e c é o número de colunas do arranjo. A notação L indica que se trata de um arranjo ortogonal e o número de colunas refere-se ao número de fatores a serem estudados.

Segundo Antony e Kaye (2000) L12, L18, L36 E L64 estão entre os arranjos que possibilitam os experimentadores a focarem em fatores principais. Para esses arranjos, os fatores são distribuídos mais ou menos de maneira uniforme a todas as colunas no arranjo. Já os demais L4, L8, L16, etc são usados amplamente quando interações são importantes no experimento. O arranjo ortogonal L4 é mostrado a seguir (figura 3):

Figura 3 - Arranjo Ortogonal L4

Ensaio Experimental	Fator A(1)	Fator B (2)	Interação entre AB ou fator C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Fonte: a autora

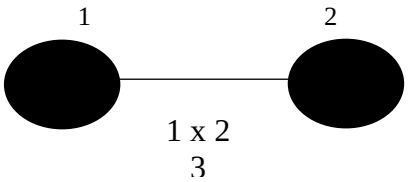
O termo confundir refere-se às influências combinadas de dois ou mais efeitos de fatores (ou interação) em um efeito medido. Em outras palavras, não se pode estimar os efeitos do fator e seus efeitos de interação independentemente. (ANTONY e KAYE, 2000).

2.2.2 Gráficos Lineares

Segundo Antony e Kaye (2000) gráficos lineares são ferramentas gráficas desenvolvidas por Taguchi para facilitar a atribuição de fatores e suas interações em um arranjo ortogonal. Os dois elementos importantes de um gráfico linear são os pontos (nós) e as linhas. O nó representa um fator principal e a linha conectando os dois nós representa a interação entre os dois fatores correspondentes.

Conforme a figura 4, em um gráfico linear, cada nó e cada linha corresponde a uma coluna e quando dois nós são conectados por uma linha, significa que a interação das duas colunas representada pelos nós é confundida com a coluna representada pela linha.

Figura 4 - Gráfico Linear L4

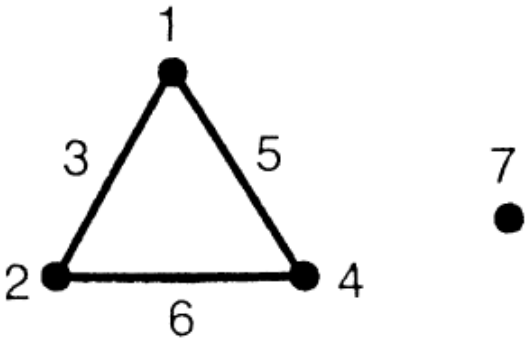


Fonte: a autora

Se três fatores forem estudados usando um arranjo ortogonal L4, então é muito importante que os fatores A e B já atribuídos às colunas 1 e 2 no OA não interajam entre si, visto que C=AB. Dessa forma, a interação entre as colunas 1 e 2 estaria confundida com a coluna 3. Nesse ponto, é essencial o conhecimento da engenharia para analisar de maneira prioritária a interação entre os fatores ou o efeito principal.

Os gráficos lineares, no entanto, não são capazes de mostrar todas as relações de confundimento, ou seja, não revela todas as interações entre todos os pares de colunas em um OA. A tabela triangular de interações resolve o problema ao mostrar as colunas e todas as possíveis interações entre elas. A figura 5 ilustra um gráfico linear padrão para L8 e a figura 6, uma tabela triangular para OA L8.

Figura 5 - Gráfico Linear Padrão para L8



Fonte: Taguchi (1987, 2005)

Figura 6 - Tabela triangular de interações

Interaction Table for L_8

Column	Column 1	2	3	4	5	6	7
1	(1)	3	2	5	4	7	6
2		(2)	1	6	7	4	5
3			(3)	7	6	5	4
4				(4)	1	2	3
5					(5)	3	2
6						(6)	1
7							(7)

Fonte: Taguchi (1987, 2005)

Pimenta et al (2012) realizaram um experimento de Taguchi com arames de aço trefilado esferoidizado, que é um produto muito utilizado na construção mecânica, pois é a matéria-prima utilizada para fabricação de vários produtos, tais como: parafusos; correntes; rolamentos e capas para velas de automóveis. Foram levantados os seguintes fatores como causas principais para descarbonetação do arame: oxidação (carepa), umidade, ciclo de tratamento térmico, ponto de orvalho, interação entre carepa e ciclo de tratamento térmico e interação entre carepa e orvalho. A seleção dos níveis foi baseada nas condições reais do processo, ou seja, o mínimo e o máximo para os fatores. Como o estudo envolve quatro fatores e suspeitava-se da existência de duas interações, foi escolhido o arranjo ortogonal L8, conforme figura 7.

Figura 7 - 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: Pimenta et al (2012)

O método de projeto de Taguchi com matriz ortogonal L9 foi implementado para otimizar os parâmetros de soldagem de arco de tungstênio de gás pulsado para a rigidez e a dureza das

soldas de aço inoxidável super duplex (SDSS, UNS S32760) (YOUSEFIEH, SHAMANIAN e SAATCHI, 2011). A este respeito, a rigidez e a dureza foram consideradas como características de desempenho. Corrente de pulso, corrente de fundo, % de tempo e frequência de pulso foram escolhidos como parâmetros principais. Cada parâmetro foi variado em três níveis diferentes. As figuras 8 e 9 ilustram, respectivamente, os parâmetros e níveis adotados para o experimento e o arranjo ortogonal L9 utilizado.

Figura 8 - Parâmetros e níveis do experimento

Table 2 Process parameters and design levels used in experiments

Character	Parameters	Units	Level 1	Level 2	Level 3
A	Pulse current	Ampere (A)	100	120	140
B	Background current	Ampere (A)	50	60	70
C	% On time	...	40	60	80
D	Pulse frequency	Hertz (Hz)	1	3	5

Fonte: Yousefieh; Shamanian; Saatchi (2011)

Figura 9 - Arranjo Ortogonal L9 para o experimento

Table 3 Experimental layout using L_9 (3^4) OA

	Factors			
Trial no.	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fonte: Yousefieh; Shamanian; Saatchi (2011)

O método de projeto experimental OA foi escolhido, pois era o mais adequado para as condições investigadas (quatro parâmetros cada um com três níveis). Os parâmetros foram inseridos na tabela padrão de Taguchi, mas a ordem dos experimentos foi feita aleatoriamente para evitar fontes de ruído que não tinham sido considerados inicialmente e que poderiam ocorrer durante um experimento e afetar os resultados de forma negativa. (YOUSEFIEH, SHAMANIAN e SAATCHI, 2011).

2.2.3 Resolução do Design

O conceito de resolução de um planejamento é uma maneira útil de catalogar planejamentos fatoriais fracionários de acordo com os padrões de associação que eles produzem. Planejamentos de resolução III, IV e V são particularmente importantes (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).

1. Planejamentos de Resolução III: esses são planejamentos em que nenhum efeito principal está associado com qualquer outro efeito principal, porém efeitos principais estão associados com interações de segunda ordem e algumas interações podem estar associadas entre si. O planejamento 2^(3-1), com I=ABC é um exemplo de resolução III. (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).
2. Planejamentos de Resolução IV: esses são planejamentos em que nenhum efeito principal está associado com qualquer outro efeito principal ou com interações de segunda ordem, porém interações de segunda ordem estão associadas entre si. O planejamento 2^(4-1), com I=ABCD é um planejamento de resolução 4. (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).
3. Planejamentos Resolução V: esses são planejamentos em que nenhum efeito principal ou qualquer interação de segunda ordem estão associados com qualquer outro efeito principal ou com interações de segunda ordem, porém interações de segunda ordem estão associadas com interações de terceira ordem. Um planejamento 2^(5-1), com I=ABCDE, é um planejamento de resolução V. (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).

2.2.4 Graus de Liberdade

Em Estatística, graus de liberdade são o número de observações que podem ser variadas independentemente umas das outras. É frequentemente representado por v. (ANTONY e KAYE, 2000).

No contexto de um projeto experimental, o número de graus de liberdade associado a um fator é igual ao número de níveis de cada fator menos um. Por exemplo, um engenheiro que deseja estudar o efeito da temperatura do barril, estudada em dois níveis, 240º e 280º, em certas peças moldadas por injeção. O fator “temperatura” é mantido em dois níveis e então o número de graus de liberdade associado a ele é igual a 1. (ANTONY e KAYE, 2000).

O número de graus de liberdade de um OA é igual ao número de ensaios experimentais menos um, devido a um grau ser sempre dotado da média global. Por exemplo, um L8 tem sete graus

de liberdade, uma vez que o número de ensaios experimentais associados à matriz é igual a 8. (ANTONY e KAYE, 2000).

Para usar um arranjo ortogonal padrão, o número de graus de liberdade associados com fatores em seus respectivos níveis deve ser combinado com o número de graus de liberdade para o OA. Por exemplo, considere o OA L12 para estudar 11 fatores em 2 níveis. O número de graus de liberdade para o OA é 11. Nesse caso não considera-se replicações ou repetições. O número de graus de liberdade associados aos fatores é dado por: v= (número de níveis-1) x (número de fatores naquele específico nível)= (2-1) x 11= 11. (ANTONY e KAYE, 2000).

Isso que implica que não se pode estudar mais de 11 fatores de dois níveis usando o OA L12. É muito importante ressaltar que o número de graus de liberdade do OA deve ser maior ou igual ao dos fatores. (ANTONY e KAYE, 2000).

No caso de haver uma interação entre fatores, o número de graus de liberdade da interação é o produto dos graus de liberdade de cada fator envolvido na interação.

Hajiaghaei-Keshteli, Aminnayeri e Ghomi (2014) realizaram um estudo sobre um modelo integrado de produção e transporte, que considera o transporte ferroviário para entregar os pedidos de uma instalação aos clientes (armazéns). O problema levantado foi determinar o cronograma de produção e a alocação do transporte ferroviário de pedidos para otimizar o atendimento ao cliente ao custo total mínimo. Diferentes destinos dos trens, as capacidades dos trens e os diferentes custos de transporte são os principais aspectos do trabalho. O método de design experimental de Taguchi é utilizado para definir e estimar os valores adequados dos parâmetros dos algoritmos para melhorar seu desempenho. (HAJIAGHAEI-KESHTELI, AMINNAYERI e GHOMI, 2014).

Segundo Hajiaghaei-Keshteli, Aminnayeri e Ghomi (2014) o GA e o SA são dois algoritmos diferentes que podem ser empregados. Considerando o GA, trabalhou-se com 8 fatores em 3 níveis e 1 fator com 5 níveis. Sendo assim, a matriz adequada conteve um grau de liberdade para a média total, dois graus de liberdade para cada fator com três níveis (2x8 = 16) e quatro graus de liberdade para o único fator com cinco níveis. Assim, a soma dos graus de liberdade necessários foi 1 + 2 x 8 + 4 = 21. Portanto, a matriz apropriada teve de ter pelo menos 21 linhas. O L27 (3 ^ 9, 9 ^ 1) foi a matriz que satisfez as condições para o algoritmo, ilustrada na figura 10.

Figura 10 - Matriz ortogonal L27 modificado para GA

Table 5
The modified orthogonal array L_{27} for the GA.

Trial	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	3	3	2
3	1	1	1	3	3	3	2	2	3
4	1	2	3	1	2	3	1	2	4
5	1	2	3	2	3	1	3	1	5
6	1	2	3	3	1	2	2	3	2
7	1	3	2	1	3	2	1	3	3
8	1	3	2	2	1	3	3	2	4
9	1	3	2	3	2	1	2	1	5
10	2	1	3	1	3	2	3	2	5
11	2	1	3	2	1	3	2	1	3
12	2	1	3	3	2	1	1	3	4
13	2	2	2	1	1	1	3	3	3
14	2	2	2	2	2	2	2	2	1
15	2	2	2	3	3	3	1	1	2
16	2	3	1	1	2	3	3	1	2
17	2	3	1	2	3	1	2	3	4
18	2	3	1	3	1	2	1	2	5
19	3	1	2	1	2	3	2	3	5
20	3	1	2	2	3	1	1	2	2
21	3	1	2	3	1	2	3	1	4
22	3	2	1	1	3	2	2	1	4
23	3	2	1	2	1	3	1	3	5
24	3	2	1	3	2	1	3	2	3
25	3	3	3	1	1	1	2	2	2
26	3	3	3	2	2	2	1	1	3
27	3	3	3	3	3	3	3	3	1

Fonte: Hajiaghaei-Keshteli; Aminnayeri; Ghomi (2014)

Onde: A= tamanho da população do transporte, B=porcentagem de reprodução do transporte; C=probabilidade de mutação do transporte; D=tamanho da população da produção; E=porcentagem de reprodução da produção; F= probabilidade de mutação da produção; G= tipo de crossover na produção; H= percentagem de tempo de transporte; H=tipo de mutação.

2.2.5 Repetição, replicação e randomização

- Repetição: um experimentador pode repetir um ensaio experimental como planejado antes de prosseguir para o próximo teste no layout experimental. Com essa abordagem o custo de setup deve ser mínimo, porém, erros de setup são improváveis de ser detectados. (ANTONY e KAYE, 2000).
- Replicação: Fazer um experimento com réplicas é muito importante, pois permite a obtenção do erro experimental e, caso a média de uma amostra seja usada para estimar o efeito de um fator no experimento, a replicação permite a obtenção de uma estimativa mais precisa desse efeito.

  O número de graus de liberdade é dado por v=(rn)-1 onde r é o número de repetições ou replicações e n é o número de ensaios no OA. (ANTONY e KAYE, 2000).
- Randomização (aleatorização): é a realização dos experimentos de maneira aleatória. Permite que todos os níveis dos fatores tenham chances iguais de serem afetados por

fontes externas de variação. Distribui-se os efeitos dos fatores uniformemente sobre as combinações de tratamento do experimento. No entanto, pode ser impraticável em alguns casos, por exemplo no caso de um grande reator sendo estudado em três temperaturas. Indo da temperatura mais baixa, passando pela média e chegando à mais elevada, pode-se completar o experimento em um dia. Mas supondo que a randomização exija que a sequência seja alta, baixa e média, esse processo pode levar até uma semana. (ANTONY e KAYE, 2000).

Ahmad et al (2013) relatam o uso do método de Taguchi na otimização dos parâmetros de sinterização de espumas de liga de titânio. A condutividade elétrica é o parâmetro mais importante a ser considerado na produção de boas placas bipolares. Para alcançar uma alta condutividade da espuma de liga de titânio, foram estudados os efeitos de quatro fatores de sinterização, nomeadamente, composição, temperatura de sinterização, taxa de aquecimento e tempo de imersão na condutividade elétrica, cada um em três níveis. Os fatores foram atribuídos a uma matriz L9. As variáveis envolvidas e três replicações foram feitas para cada experimento, como mostrado nas figuras 11 e 12 abaixo, respectivamente. Os resultados mostraram que uma combinação de A2B2C1D2 resultou na máxima condutividade elétrica (876,92 S/cm), enquanto a combinação A0B0C0D0 produziu a condutividade elétrica mínima para a espuma de liga de titânio (300,76 S/cm).

Figura 11 - Fatores e respectivos níveis em um OA L9 para o experimento

Table 1: Factor level in the experiment and Orthogonal array

Experiment no.	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	Composition	Experimental value sintering Temperature (°C)	Heating rate (°C min^{-1})	Soaking time (min)
1	0	0	0	0	60	1200	1.5	60
2	0	1	1	1	60	1250	1	90
3	0	2	2	2	60	1300	0.5	120
4	1	0	1	2	65	1200	1	120
5	1	1	2	0	65	1250	0.5	60
6	1	2	0	1	65	1300	1.5	90
7	2	0	2	1	70	1200	0.5	90
8	2	1	0	2	70	1250	1.5	120
9	2	2	1	0	70	1300	1	60

Fonte: Ahmad et al, (2013)

Figura 12 - Resultados das replicações do experimento
Table 2 Result Electrical Conductivity of titanium alloy foams

Experiment	Replication, conductivity (S/cm^{-1})			Average
	R1	R2	R3	
1	324.12	232.75	345.42	300.76
2	205.94	414.54	630.93	417.14
3	301.51	530.63	685.2	505.78
4	545.79	590.96	409.78	515.51
5	329.13	358.02	319.66	335.60
6	407.68	455.6	366.63	409.97
7	1006.22	750.83	644.6	800.55
8	692.91	945.38	921.7	853.33
9	1095.47	835.47	699.83	876.92

Fonte: AHMAD et al, (2013).

2.2.6 Classificação dos Fatores

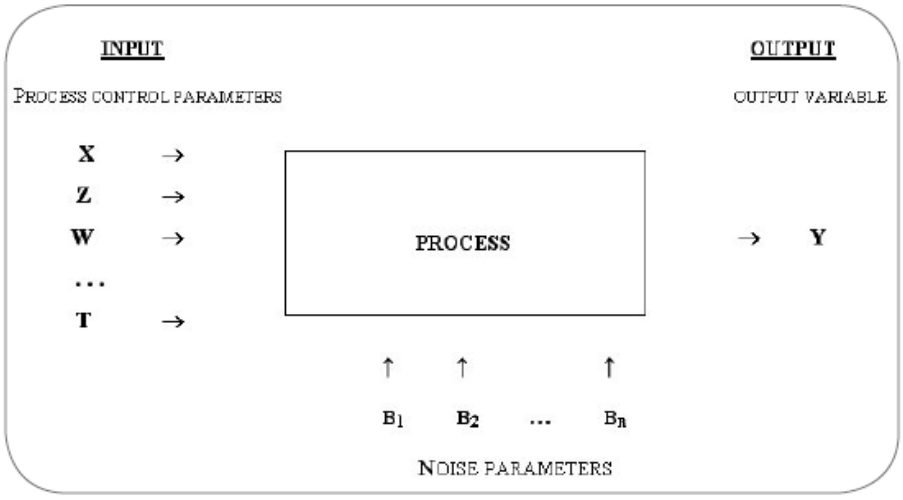
No projeto de parâmetros, existem dois tipos de fatores que afetam a característica funcional de um produto: fatores de controle e fatores de ruído. Os fatores de controle são os fatores que podem ser facilmente controlados, como escolha do material, tempo do ciclo ou temperatura do molde em um processo de moagem de injeção. Os fatores de ruído são fatores difíceis, impossíveis ou muito caros de controlar. (SIMPSON, 2000)

Silva Neto, Siqueira e Silva (1998) utilizaram Taguchi para minimizar o conteúdo de álcool que é incorporado ao efluente industrial e simultaneamente maximizar o conteúdo de álcool no topo da coluna de retificação. O éter etílico é fabricado a partir de álcool etílico que pode ser adquirido no mercado ou ser proveniente da retificação do álcool residual que é o efluente do processo de desidratação da nitrocelulose. Para isso, foram levantadas as possíveis causas que poderiam influenciar na maior ou menor quantidade de álcool no efluente e no topo da coluna de retificação, sendo selecionadas as seguintes variáveis a serem investigadas (fatores de controle): temperatura da coluna de condensação, temperatura de condensação, quantidade de carbonato de cálcio por batelada e quantidade de hidróxido de sódio por batelada, com dois níveis cada.

A indústria exige que a ciência realize transformações controladas (variabilidades), quer para criar novos produtos e processos, quer para melhorar os existentes. Um processo industrial (esquema 13) pode ser definido como o conjunto de regras e condicionamento de materiais

para a produção de um material bom. Matérias-primas, equipamentos, trabalhadores, práticas operacionais (especificação dos parâmetros, tolerâncias) fazem parte de um processo industrial. Para controlá-lo, um certo número de parâmetros básicos (denominados "parâmetros de controle" ou "parâmetros do processo") devem permanecer fixos para evitar variabilidades importantes. Outro número de parâmetros (os parâmetros de ruído) pode variar entre certos limites mais ou menos definidos e seu controle nem sempre é conveniente devido a razões econômicas ou materiais. (NOMAKSTEINSKY, 2008)

Figura 13 - Esquema representativo dos tipos de parâmetros e suas relações



Fonte: Nomaksteinsky (2008)

Um dos objetivos essenciais da engenharia robusta é a redução da variabilidade de saída em torno dos valores especificados. Isso significa centralizar o processo no valor nominal e reduzir sua variabilidade intrínseca. No passado, a prática comum estava tentando reduzir a variabilidade intrínseca eliminando os ruídos de processamento. Esta estratégia pode ser economicamente inviável, bem como tecnicamente impossível. O método proposto por G. Taguchi (1985) e desenvolvido na literatura Phadke (1989), citado por Nomaksteinsky (2008) é tentar eliminar ou minimizar não os ruídos, mas os efeitos deles. Isso significa identificar os efeitos espalhados dos parâmetros de processamento e usar esses efeitos para minimizar o impacto dos fatores de ruído na variabilidade geral. (NOMAKSTEINSKY,2008)

Por exemplo, no caso de uma indústria que produza massa pronta de bolo, fatores de controle seriam quantidade de farinha, de fermento, de gordura, de ovo desidratado, etc. O desempenho do bolo depende desses fatores, mas também de alguns que não são controlados pelo fabricante, a exemplo da temperatura e o tempo de forno utilizados pelo cliente na sua preparação. O objetivo da empresa que produz esse produto é desenvolver uma receita,

fixando níveis para os fatores controláveis, de tal forma que o bolo tenha boa aceitação e seja pouco sensível às variações que ocorrem na temperatura e tempo de preparo do bolo pelo cliente.

Segundo Souza e Bagno (2014) para todo e qualquer produto, processo ou tecnologia, o desempenho de sua função elementar pode ser influenciado por diversos fatores - alguns controláveis e outros não. Assim, “robustez” é um conceito necessário para que os requisitos de qualidade para o cliente ou os requisitos específicos do projeto sejam satisfeitos. Um produto se torna robusto quando o seu desempenho funcional não sofre influência significativa de fatores que não possam ser controlados.

2.2.7 Escolha das características de qualidade para experimentos industriais

A característica de qualidade (ou resposta de interesse) pode ser definida com uma característica que o experimentador quer mensurar em um experimento, a fim de avaliar a qualidade de um produto. (ANTONY e KAYE, 2000).

Na concepção de um produto, interessa-se na melhoria da confiabilidade do produto através do aumento de sua vida. Na projeção de um processo de fabricação, interessa-se na maximização da produção pela redução da taxa de sucata ou número de defeitos. O sucesso final do produto ou processo depende de quão bem essa resposta conhece as expectativas dos clientes. (ANTONY e KAYE, 2000).

2.2.8 Considerações de Metrologia para Experimentação Industrial

Para experimentos industriais, a resposta variável ou variável dependente deverá ser medida por método direto, indireto ou comparativo. Os métodos de medição, no entanto, produzem variações na saída ou resposta. Quando avaliamos desempenho do processo, algumas das fontes de variação mais comuns são o processo de medição, o equipamento de medição e o próprio método de teste (ANTONY E KAYE, 2000).

Uma vez que nenhuma medição é feita com exatidão total (isenta de erro de medição), é importante um estudo dos erros, quer para se tentar encontrar meios para os reduzir, quer para poder avaliar até que ponto se pode confiar no resultado da medição. (ALVES, 2003, p 30).

Segundo Antony e Kaye (2000) os métodos de medição podem ser diretos, indiretos ou comparativos.

- Método direto: aquele em que o valor da quantidade a ser mensurada é obtido diretamente.
- Método indireto: o valor da quantidade é obtido de medições feitas por métodos diretos de outras quantidades relacionadas com a quantidade a ser mensurada por uma relação conhecida.
- Método comparativo: comparação do valor da quantidade a ser mensurada com um valor conhecido da mesma quantidade.

De acordo com Antony e Kaye (2000) precisão é expressa quantitativamente como o desvio padrão dos valores observados de repetidos resultados sob condições idênticas. Acurácia é a propriedade em que a média das repetidas medições feitas em uma única unidade de produto diferem do valor verdadeiro.

A chave para gerenciar processos é a medição. Engenheiros devem se esforçar para criar medidas úteis ao processo e que sejam feitas nas características de qualidade de um produto que represente os requisitos do cliente. Quando o processo de manufatura não é capaz de encontrar limites de especificação, um estudo de medição é necessário para determinar se os esforços de melhoria devem ser feitos no processo de manufatura ou de medição. (ANTONY E KAYE, 2000).

Repetibilidade e Reproducibilidade, por sua vez, analisam a variação das medidas pelos equipamentos e operadores, respectivamente. Repetibilidade refere-se à variação nas medições observadas quando um operador usa o mesmo equipamento (com a mesma calibração) várias vezes para mensurar a mesma características na mesma peça. Já Reproducibilidade refere-se à variação nas medições obtidas quando vários operadores usam o mesmo equipamento (com a mesma calibração) para mensurar a mesma característica na mesma parte (ou amostra). (ANTONY E KAYE, 2000).

2.2.9 ANOVA

A mais poderosa ferramenta analítica para identificar os efeitos principais e de interação é a análise de variância (ANOVA), usada para subdividir a variação total dos dados em componentes úteis e significativos de variação. No contexto de experimentos com matrizes

ortogonais, ANOVA é uma ferramenta útil para subdividir a variação total em variação devido a efeitos principais, variação devido a efeitos de interação e variação devido a erro. Matematicamente, pode-se escrever: Variação Total= Vm+ Vi+ Ve, sendo que Vm= variação devido a fatores principais; Vi= variação devido a efeitos de interação e Ve= variação do erro. Os resultados da ANOVA são geralmente mostrados em uma tabela chamada uma Tabela ANOVA. (ANTONY E KAYE, 2000).

A tabela ANOVA geralmente compreende os elementos que seguem segundo (ANTONY E KAYE, 2000):

- **Fonte de Variação (Source of variation):** Representa os vários componentes de variação que contribuem para a variação total. Isso inclui efeitos principais, efeitos de interação e erro.
- **Soma de quadrados (sum of squares):** trata-se da soma de quadrados para cada componente de variação e a variação total. Representa o desvio quadrado de uma variável aleatória de sua média. A soma dos quadrados devido aos efeitos principais e de interação é uma medida da variabilidade pela contribuição dos fatores ou suas interações, respectivamente. Para fatores em dois níveis, a soma dos quadrados (SS) devido aos efeitos principais ou de interação pode ser calculada pela seguinte equação: SS= N/4. [efeito]², onde N=n x r= número total de observações no experimento; n=número de ensaios experimentais no arranjo ortogonal; r= número de repetições ou replicações; efeito é a magnitude do efeito principal ou de interação.

  A soma dos quadrados total, que mede a variação total nos dados, pode ser calculada pela equação que segue:

Figura 14 - Soma de quadrados total

$$SS_{Total} = \sum X^2 - \frac{\left(\sum X\right)^2}{N}$$

Fonte: Psycology Emory [2017?]

Nesta equação, SStotal representa a soma total dos quadrados, ou seja, a variação total; X= valores de resposta observados individualmente; o somatório de X é o total geral de valores de resposta e, dividido por N, corresponde ao fator de correlação= soma dos quadrados devido à média.

- **Graus de Liberdade:** como já falado, o número de graus de liberdade de cada fator é igual ao número de níveis do fator menos 1; da interação é obtido pela multiplicação

dos graus de liberdade de cada fator envolvido em um efeito de interação; os totais são calculados a partir do número total de valores de resposta observados para o experimento menos um. E, por fim, os graus de liberdade de erro são iguais aos graus de liberdade totais subtraídos dos graus de liberdade para os efeitos principais e de interação.

- **Média dos quadrados (mean square):** é encontrada pela divisão da soma de quadrados pelo número de graus de liberdade associados com os efeitos do fator. Matematicamente, é representada por: MS=SS/v, onde v= graus de liberdade associados com efeito principal ou de interação. A média dos quadrados devida ao erro (MSE) é chamada de variação do erro.
- **Relação F ou Estatística F:** A estatística F mede o efeito de cada fator ou interação em relação ao erro. Especificando, é a razão da média dos quadrados devido ao efeito do fator, ou da interação, pela variação do erro (às vezes chamada de média dos quadrados devido ao erro). A suposição usual em relação à estatística F é que as medidas individuais são independente e normalmente distribuídas.
- **Percentual de contribuição:** Mede a variação percentual real pela contribuição de um fator ou sua interação na variação total. O percentual de contribuição pode ser obtido pela divisão da soma pura dos quadrados para aquele fator ou interação pela soma de quadrados total e multiplicação do resultado por 100. A soma pura dos quadrados pode ser obtida pela equação: SS'= SS-[MSE x v] onde SS é a soma dos quadrados devido ao efeito principal ou interação, v é o número de graus de liberdade associado com efeito principal a MSE é a média dos quadrados para o erro.

O percentual de contribuição é dado por: p= (SS'/SSt) x 100.

Ferramentas gráficas como Pareto e gráficos normais são também recomendados para identificação dos efeitos principais e de interação significantes.

Varghese e Annamalai (2013) utilizaram Taguchi para otimizar os parâmetros de corte utilizando o processo de rotação. Os parâmetros avaliados são a velocidade de corte, a taxa de alimentação, a profundidade de corte, o comprimento da ferramenta, do suporte da ferramenta e a refrigeração, cada um com três níveis. Para isso, usaram um L27. Eles avaliaram os impactos que cada fator gerava para a rugosidade da superfície. A análise ANOVA revelou que o comprimento da ferramenta do suporte da ferramenta (26,92%), a profundidade de corte (26,92%) e a velocidade de corte (20%) tem boas influências sobre a rugosidade da superfície e trabalha-los é importante para o bom acabamento da superfície (figura 15). Os autores

concluíram que o método de Taguchi é um método experimental, porém realista em sua natureza e resolve o problema da experimentação com grande número de variáveis.

Figura 15 - ANOVA para rugosidade de superfície do experimento

Table IV: Anova table for surface roughness

Factor	Sum of squares	Percentage Contribution
Cutting speed	12.835	20%
Feed rate	11.486	18%
Length of the tool from the tool holder	13.653	26.92%
Depth of cut	13.653	26.92%
Coolant	10.652	14.32%

Fonte: Varghese; Annamalai (2013)

No experimento de Ahmad et al (2013) na ANOVA, os efeitos dos fatores de sinterização de espumas de ligas de titânio na condutividade elétrica foram determinados. A composição de pó de titânio (A) tem efeito significante na condutividade elétrica no nível de significância de 99% ou alfa=0.005. Por outro lado, a temperatura de sinterização (B) e taxa de aquecimento (C) não tiveram nenhuma contribuição para o experimento. O tempo de imersão (D), por sua vez, teve 1,59% de contribuição para o experimento. Esses resultados são ilustrados na figura 16.

Figura 16 - ANOVA para condutividade elétrica do experimento

Table 3 ANOVA for electrical conductivity of titanium alloy foam at $\alpha = 0.005$

Variable	Degrees of Freedom, f_n	Sum squared, S_n	Variance, V_n	Pure Sum squared, S_n	Varience ratio, F_n	Critical F value	Contribution, P_n
A	2	1107386	553693	1064787	25.996	$F_{0.005,2,18}$=7.2148	66.04
B	2	21953.22	10976.6		0.515		
C	2	31479.77	15739.9		0.739		
D	2	68209.997	34105	25611.12	1.601		1.59
error	18	383389.9	21299.4				32.38
Total	26	1612418.9					100.00

Fonte: Ahmad et al (2013)

2.2.10 Relação Sinal-Ruído (Signal-to-noise ratio ou SNR)

Taguchi desenvolveu o conceito de relação sinal-ruído na engenharia da qualidade para avaliar o desempenho funcional do sistema. O objetivo de usar a SNR como medida de desempenho é desenvolver produtos e processos insensíveis a fatores de ruído. Mensura a sensibilidade da característica de qualidade investigada de maneira controlada em comparação com os fatores externos de influência que não estão sob controle. (ANTONY E KAYE, 2000). O objetivo de qualquer experimento é sempre atingir o máximo SNR, o que significa que o sinal é mais alto que os efeitos aleatórios do ruído. Configurações de fatores com altos SNR sempre produzem a qualidade ideal com variância mínima. Taguchi mostrou quatro relações sinal-ruído mais comuns para características de qualidade em experimentos industriais:

- SNR para menor-é-melhor características de qualidade, dada pela fórmula: $S/R = -10*\log(\Sigma(Y^2)/n)$, em que y é o valor de resposta observado em cada ponto do projeto experimental e n é o número de observações em cada ensaio experimental.
- SNR para maior-é-melhor características de qualidade, dada pela fórmula: $S/R = -10*\log(\Sigma(1/Y^2)/n)$
- SNR para nominal-é-melhor características de qualidade, dada pela fórmula: $S/R = -10*\log(s^2)$ ou $\frac{S}{N} = 10 * \log\left(\frac{\overline{Y}^2}{s^2}\right)$. A primeira é recomendada se o objetivo do experimento é somente reduzir variabilidade excessiva na resposta. Nesse caso, s^2 é a variância da amostra em cada ponto do projeto experimental. Já a segunda é recomendada se o objetivo do experimento é reduzir variabilidade na resposta e depois trazer a resposta média o mas próximo possível do valor alvo ou nominal.

Zhang, Wang e Yang (2014) utilizaram Taguchi para estudo da erosão do solo. Como no estudo o importante foi identificar as melhores condições em que ocorreria erosão máxima do solo, logo, a relação maior é melhor foi utilizada. Os fatores investigados foram comprimento da inclinação (L); inclinação gradiente (S) e intensidade da chuva (I). Os resultados a serem investigados foram taxa média de erosão e de escoamento. Os resultados dos cálculos da relação sinal-ruído foram apresentados na figura 17.

Figura 17 - Taxa média de erosão e escoamento e S/N para cada teste do L25

Table 2
Mean erosion and runoff rates at steady state, and the S/N[a] ratio of each of the 25 different Taguchi designed experimental test combinations.

Test number	Factor			Erosion rate		Runoff rate	
	[a]S	I	L	D_i	S/N	R	S/N
1	18	48	0.4	1.2	1.3	18.3	25.3
2	18	62	0.8	2.1	6.5	32.1	30.1
3	18	102	1.2	4.2	12.4	58.4	35.3
4	18	149	1.6	4.8	13.4	87.0	38.8
5	18	170	2.0	8.6	16.0	95.5	39.6
6	27	48	0.8	1.9	5.6	25.6	28.2
7	27	62	1.2	3.1	9.5	35.5	31.0
8	27	102	1.6	5.1	14.1	69.1	36.8
9	27	149	2.0	8.5	17.8	88.4	38.9
10	27	170	0.4	10.2	20.1	78.1	37.8
11	36	48	1.2	1.6	3.9	23.8	27.5
12	36	62	1.6	2.6	6.1	35.7	31.0
13	36	102	2.0	7.2	17.0	65.5	36.3
14	36	149	0.4	9.3	19.4	71.1	37.0
15	36	170	0.8	13.8	*22.7*	103.4	40.3
16	47	48	1.6	2.7	8.5	28.3	29.0
17	47	62	2.0	3.7	11.1	42.7	32.6
18	47	102	0.4	6.2	15.7	47.2	33.5
19	47	149	0.8	11.1	20.9	92.1	39.3
20	47	170	1.2	13.0	22.2	111.9	*41.0*
21	58	48	2.0	1.9	5.3	25.3	27.9
22	58	62	0.4	5.0	11.2	24.9	27.8
23	58	102	0.8	8.7	18.8	64.0	36.1
24	58	149	1.2	9.5	19.4	91.3	39.2
25	58	170	1.6	11.2	20.9	108.8	40.7

[a] S/N, signal-to-noise ratio; S, slope gradient (%); I, rainfall intensity (mm h^{-1}); L, slope length (m); D_i, mean steady-state erosion rate for each test (kg m^{-2} h^{-1}); R, mean steady-state runoff rate for each test (mm h^{-1}). Italicized values identify the maximum S/N values in these tests.

Fonte: Zhang; Wang; Yang (2014)

A substituição dos valores das proporções S/N indicadas na tabela na fórmula (análise da média) abaixo possibilitou o cálculo das máximas taxas de erosão e escoamento:

Figura 18 - Fórmula da média das razões S/N

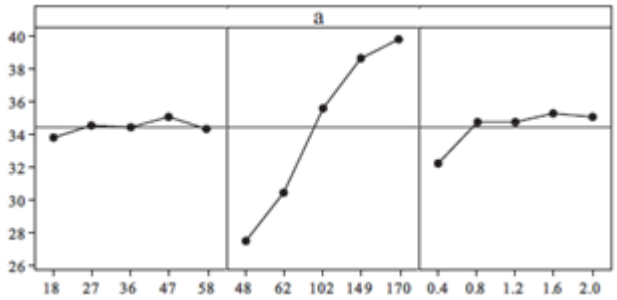
$$(M)_{\text{Factor}-l}^{\text{Level}-i} = \frac{1}{n_{li}} \sum_{j=1}^{n_{li}} \left[\left(\frac{S}{N} \right)_{\text{Factor}-l}^{\text{Level}-i} \right]_j$$

Fonte: Zhang; Wang; Yang (2014)
Nota: Onde (M) é a média das razões S / N do fator “l” no nível i, “nli” representa o número de ocorrências do fator l no nível i.

As condições ótimas foram então identificadas como aquelas que produzem o valor médio mais alto das relações S / N de cada fator em um determinado nível.

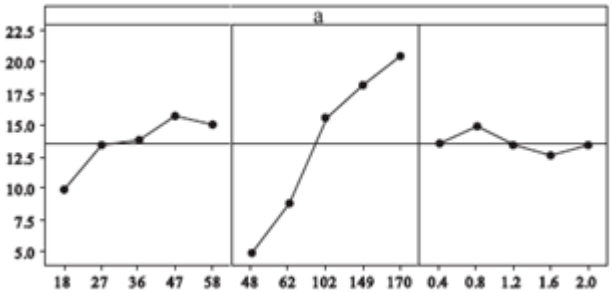
Portanto, dentro da combinação das condições de teste usadas neste estudo, as condições ideais foram um gradiente de inclinação de 47%, uma intensidade de precipitação de 170 mm h^{-1}, e um comprimento de inclinação de 0,8 m para produzir a taxa máxima de erosão (figura 19); e o mesmo gradiente de inclinação e intensidade de precipitação em combinação com um comprimento de inclinação de 1,6 m para produzir a taxa máxima de escoamento (figura 20).

Figura 19 - Média da relação sinal-ruído (S/N) para taxas de erosão média afetadas por gradiente de inclinação, intensidade de precipitação e comprimento da inclinação, respectivamente



Fonte: Zhang; Wang; Yang (2014). Adaptado.

Figura 20 - Média da relação sinal-ruído(S/N) para taxas de escoamento médio afetadas por gradiente de inclinação, intensidade de precipitação e comprimento da inclinação, respectivamente



Fonte: Zhang; Wang; Yang (2014). Adaptado.

As condições ótimas dentro dos valores dos parâmetros selecionados para rigidez foram encontradas como o primeiro nível de corrente de pulso (100 A), o terceiro nível de corrente de fundo (70 A), o primeiro nível de % no tempo (40%) e o primeiro nível de frequência de pulso (1 Hz), enquanto foram encontrados como o segundo nível de corrente de pulso (120 A), segundo nível de corrente de fundo (60 A), segundo nível de % no tempo (60%) e terceiro nível de frequência de pulso (5 Hz) para dureza. O método de Taguchi foi considerado uma ferramenta promissora para obter as melhores condições para esses estudos.

No trabalho de Amin, Muhamad e Jamaludin (2013) as matérias-primas foram moldadas por injeção para produzir peças verdes. Várias variáveis de processamento, nomeadamente o carregamento em pó, a temperatura da injeção, a pressão de retenção e a taxa de injeção, foram otimizadas em relação à densidade da peça verde, tida como fator de resposta. Ao considerar a umidade e o nível das condições da manhã e da noite como fatores de ruído, os resultados mostraram a combinação ideal de parâmetros de moldagem por injeção que produz a melhor densidade da peça verde. A relação S/N foi determinada e a significância de cada fator foi analisada pelo delta que representava a diferença entre o mais alto valor obtido para o S/N e o menor nas repetições de cada fator. Dessa forma, concluiu-se que o fator D (pressão de retenção) tem maior contribuição (figura 21). Segundo os autores, é devido ao fato de que

a pressão de retenção garante a uniformidade da densidade na cavidade e, se a pressão de retenção não for suficiente, podem ocorrer quedas na superfície.

Figura 21 - Valores de S/N e delta segundo as variáveis do experimento

TABLE 3:
RESPONS TABLE FOR S/N VALUES

	A	B	C	D
	-92.04	-94.08	-83.56	-82.27
	-92.15	-101.5	-91.87	-103.23
		-80.70	-100.85	-90.78
Δ	0.11	20.81	17.29	20.96
Rank	4	2	3	1

Fonte: Amin; Muhamad; Jamaludin (2013)

2.2.11 Passos para implantação de Taguchi

Pesquisa recente mostrou que a aplicação de métodos estatísticos pela engenharia nas empresas de manufatura é limitada devido à falta de habilidades necessárias na fabricação e conhecimento estatístico inadequado para a resolução de problemas. (ANTONY e KAYE, 2000).

(ANTONY e KAYE, 2000) trazem 10 passos para facilitar a implantação de Taguchi nas organizações focados em um método genérico de classificação de problemas de processo de fabricação em termos da qualidade do produto e efetividade do processo e mostra como esses passos assistem as companhias a enfrentar problemas de qualidade de maneira mais eficiente.

1- Visão geral do produto ou processo: compreende o entendimento geral do processo ou produto a ser estudado para identificar áreas onde problemas de qualidade são de ocorrência comum. Recomenda-se o uso de fluxogramas para essa tarefa e, posteriormente, processo de falha e análise de efeitos para priorizar os problemas de acordo com sua gravidade. Deve ser formada uma equipe multidisciplinar para discutir esses pontos.
2- Identificação do problema, formulação e classificação: pode-se usar o brainstorming para identificação do problema a ser investigado. Tendo identificado esse problema,

pode-se usar a análise de causa e efeito, para investigar as principais causas do problema.

3- Identificação dos parâmetros de processo (fatores) e interações de interesse: é importante assegurar que os parâmetros de processo selecionados realmente providenciem informações necessárias e pertinentes sobre o problema. Algumas formas de identificar fatores potenciais são através do uso do brainstorming, dados históricos e uso do conhecimento do processo pela engenharia. O número de fatores depende do tamanho do experimento e relaciona-se com os custos do experimento e o tempo gasto para realiza-lo. Após escolhidos, devem ser classificados em fatores de controle e ruído e serem verificadas as interações.

4- Selecionar níveis e alcance do fator: se a relação esperada entre entrada e saída do processo é linear, é recomendado o uso de 2 níveis. Caso seja não linear, três ou mais. Os níveis devem ser distantes o suficiente para que, caso haja um efeito importante, ele seja observado e, nem tão distantes que um processo diferente já esteja operando.

5- Seleção da resposta (ou característica de qualidade) e método de medição: é sugerido começar essa etapa a partir da meta de engenharia e meta econômica. Posteriormente, identificar os mecanismos fundamentais e leis físicas que afetam esta meta. A resposta deve ser relacionada a mecanismos de engenharia básica de tecnologia. O método de medição da resposta, por sua vez, deve ser bem definido. Para isso, a escolha de equipamento a ser usado, como mensurar, onde medir e onde documentar os dados. Por último, deve ser identificado o tipo de característica de qualidade que precisa ser otimizada. (ANTONY e KAYE, 2000) defendem a existência de quatro tipos de características de qualidade: Menor-é-melhor, maior-é-melhor, nominal-é-melhor e atributos classificados de acordo com a resposta que se deseja obter do experimento.

6- Escolher um arranjo ortogonal: essa escolha deve ser feita a partir do estudo dos graus de liberdade do experimento.

7- Preparação para o experimento e operação: é reconhecido que essa fase envolve aquelas atividades que ocorrem antes da realização real do experimento. Uma preparação não adequada é a principal causa de resultados inconclusivos. Alguns pontos a serem observados são a seleção de um ambiente apropriado, não afetado por fontes externas de ruído e o mais próximo possível do ambiente do usuário; disponibilidade de recursos; análise custo-benefício do experimento; preparação de fichas de dados experimentais; ter visão geral do propósito e objetivo do experimento e manter toda a equipe informada.

8- Analisar os dados experimentais: um encontro curto com os envolvidos no experimento para discutir as percepções gerais, ocorrências inesperadas e discrepâncias deve ser realizado. Se o experimento foi projetado corretamente e desenvolvido de acordo com o projetado, então análises estatísticas irão fornecer ao experimentador com conclusões estatisticamente válidas. Métodos de análise incluem a análise de variância (ANOVA), para identificar efeitos principais e de interações ; a SNR para atingir a robustez e previsões de resposta nas condições ótimas. Gráficos também são ferramentas que auxiliam no entendimento do processo.
9- Interpretações e conclusões experimentais: De acordo com o alcance do objetivo, pode ser necessária a execução de etapas anteriores do planejamento de experimentos novamente para validar as informações obtidas. As conclusões experimentais geralmente se encaixam em três categorias: claras, sem ambiguidade para suportar as conclusões; forte negação das hipóteses em que as metas precisam ser reajustadas, pois o objetivo não é atingido e conclusões fracas, em que os objetivos são questionáveis.
10- Confirmação do experimento: realizar um experimento de confirmação é necessário para verificar os resultados das análises estatísticas. Pode ser executado para confirmar as configurações ótimas do fator obtidas no passo anterior. É essencial que, uma vez a solução seja implementada, o processo seja monitorado e isso pode ser feito através de gráficos de controle.

2.2.12 Exemplos de emprego da metodologia de Taguchi

Uma aplicação foi realizada em uma grande empresa de autopeças que enfrentou o desafio de nacionalizar a produção de painéis de carros equipados com airbag. A peça em questão é um componente plástico do sistema de airbag (chamado de “capa superior”). A aplicação da Engenharia Robusta sugeriu mudanças em alguns parâmetros anteriormente selecionados relacionados com a produção, a fim de se obter o mínimo de desvios dimensionais em pontos considerados críticos para o desempenho do airbag. Para a realização do estudo, foram executadas as etapas a seguir, segundo Souza e Bagno (2014):

Definição e Medição da Função básica do sistema: A função principal do sistema era produzir componentes nas dimensões especificadas (buscando menor somatório possível dos

desvios de cada ponto selecionado na especificação de projeto). A medição foi realizada por um dispositivo tridimensional de alta precisão. (SOUZA E BAGNO, 2014).

Definição dos Fatores de controle, de ruído e seus níveis: Os fatores de controle escolhidos foram pressão de injeção/recalque, a matéria-prima utilizada (fornecedor nacional ou estrangeiro), a temperatura da água, tempos entre a solidificação e a extração da peça e tipo de embalagem. Os principais fatores de ruído considerados no sistema foram listados como: a) variações de lote de matéria-prima; e b) variações de temperatura da água no interior do molde. Entretanto, para evitar a influência de outros possíveis fatores de ruído não previstos, foi estabelecido construir um número de 5 amostras válidas para cada configuração indicada pelo arranjo ortogonal. (SOUZA E BAGNO, 2014)

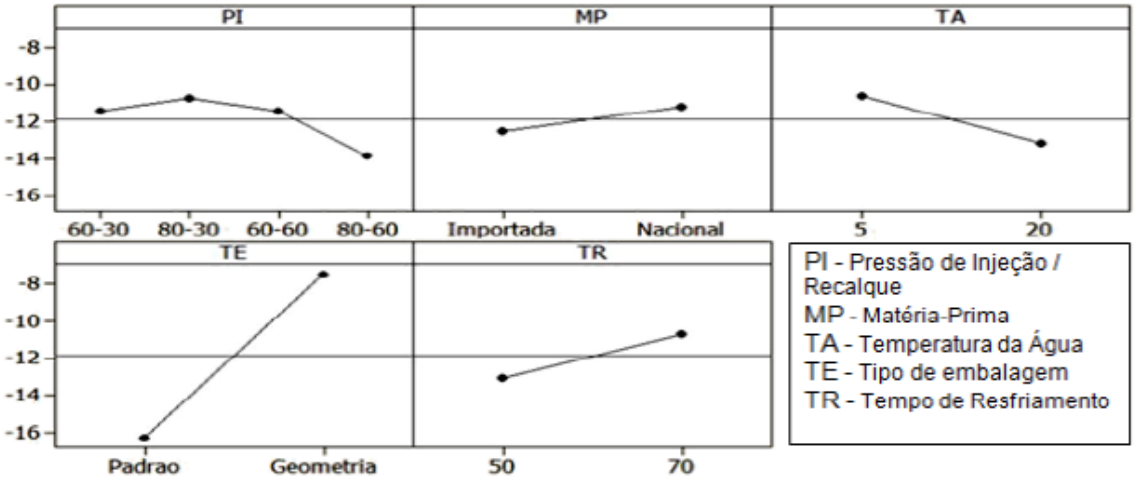
Definição do Arranjo Ortogonal adequado: Uma vez que os fatores de controle e de ruído foram definidos, o arranjo ortogonal escolhido foi o de tipo L8. Para garantir correto rastreamento dos protótipos, as peças foram identificadas conforme cada uma das configurações apontadas. (SOUZA E BAGNO, 2014)

Critérios e procedimentos para realização do experimento: Para cada linha do arranjo ortogonal, foram injetadas cinco peças, resultando em quarenta peças no total. O objetivo era a melhor condição dimensional (menor somatório dos módulos dos erros dimensionais) nos pontos que recebem o encaixe com a capa inferior do airbag. (SOUZA E BAGNO, 2014)

Coleta e análise dos dados: Após a etapa de planejamento, foram feitos dois dias de try-out's: no primeiro dia, utilizaram-se embalagens conforme padrão da empresa (linhas 1, 4, 5 e 8 do arranjo) e, no segundo dia, embalagens conforme geometria da peça (linhas 2, 3, 6 e 7). O tipo de variável resposta aplicado ao estudo é "menor melhor", o que elimina a necessidade de um ajuste posterior da média da variável de saída do sistema (FOWLKES; CREVELING, 1995) citado por Souza e Bagno, (2014).

Definição dos níveis mais robustos para os parâmetros de controle: Os dados foram inseridos no módulo de Taguchi do software Minitab v16 e a relação sinal-ruído para o experimento pode ser observada na Figura 22.

Figura 22 - Gráfico relação Sinal- Ruído para o experimento



Fonte: Souza; Bagno (2014)

Combinação ideal dos Parâmetros de Controle e experimento confirmatório: conforme os dados acima, segue a configuração ideal: 80 bar de pressão com 30 bar de recalque; matéria-prima nacional; água de resfriamento a 5ºC; embalagem conforme geometria da peça e tempo de resfriamento de 70s. Foi produzido um lote de 50 peças na configuração ideal, sendo que as cinco últimas foram consideradas para o teste dimensional.

Para a peça em estudo, os ganhos na aplicação da engenharia robusta trouxeram resultados expressivos, uma vez que houve uma redução nos índices de refugo na ordem de 13% para 2,66%.

Outra aplicação da metodologia foi feita por Ribeiro et al (2002) no processo de usinagem do aço ABNT 1045. Para essa usinagem, estudou-se a influência das variáveis no processo, tais como: velocidade de avanço da placa, ângulo da ferramenta de corte e profundidade de corte da ferramenta, cada uma nos níveis baixo, médio e alto. A proposta deste artigo foi a obtenção de melhor acabamento superficial. Foi usado para isso o arranjo ortogonal L9, com as variáveis atuando em três níveis; a relação sinal ruído S/N para função foi menor-é-melhor; e a análise da variância foi usada visando identificar a significância dos fatores e seus efeitos no processo. Evidenciou-se que o melhor ajuste e a melhor condição avaliada para otimização do processo de usinagem do aço ABNT 1045, foram todos os fatores atuando em nível baixo. Os autores concluíram que o método estatístico e experimental de Taguchi mostrou-se ágil, eficiente e adequado para identificar de maneira satisfatória a influência de cada fator presente no processo de usinagem sobre a variável resposta o parâmetro de rugosidade superficial.

Ozcelik (2011) realizou um estudo com intuito de otimizar o efeito dos parâmetros de injeção e da linha de solda nas propriedades mecânicas das moldagens de polipropileno (PP). A

moldagem por injeção plástica é um dos métodos mais importantes no setor de plástico. As linhas de solda podem ocorrer no produto de plástico quando duas frentes de fluxo se encontram devido a moldes ou inserções. A linha de solda influencia o visual e a estrutura dos produtos. Elas também diminuem as propriedades mecânicas dos mesmos. A compensação deste problema pode ser reduzida através da otimização dos parâmetros de moldagem por injeção e das condições de projeto. (OZCELIK, 2011)

Foram investigados os efeitos da temperatura de fusão, da pressão de empacotamento e da pressão de injeção na resistência mecânica de espécimes com /sem linhas de solda. O projeto de matriz ortogonal L9 de Taguchi foi empregado para o plano experimental. Como resultado, foram medidas as propriedades mecânicas, tais como a carga de tração máxima, a extensão à ruptura e a resistência ao impacto de charpy (entalhada) das espécimes. A relação sinal-ruído para propriedades mecânicas de PP usando o método de Taguchi foi calculada e o efeito dos parâmetros de injeção e da linha de solda em propriedades mecânicas foi determinado utilizando a análise de variância (ANOVA). Além disso, modelos lineares também foram criados usando a análise de regressão. Foi observado pelas análises que o parâmetro mais importante que afeta a carga de tração máxima e a extensão à ruptura (para a amostra sem /com linha de solda) foi a pressão de injeção e a temperatura de fusão, e para a resistência ao impacto de charpy (com / com linha de solda) foi a temperatura de fusão e injeção de pressão, respectivamente.

2.3 Transporte Ferroviário

O transporte ferroviário é realizado sobre linhas férreas, as mercadorias transportadas neste modal são geralmente de baixo valor agregado e em grandes quantidades como o minério, produtos agrícolas, fertilizantes, carvão e derivados do petróleo. Grande parte da malha ferroviária do Brasil esta concentrada nas regiões sul e sudeste, em três estados: São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, com predominância para o transporte de cargas. (ROCHA, 2015)

O transporte ferroviário apresenta grande eficiência energética, ainda que, com um custo fixo de implantação e manutenção elevado. O transporte sobre trilhos, no Brasil, representa aproximadamente 19,46% da matriz de cargas e 1,37% da matriz de passageiros, considerando transporte metro e ferroviário (CNT, 2006) citado por (ROCHA, 2015).

Segundo BIT (2013) citado por Rocha (2015) algumas características do transporte ferroviário de carga no Brasil são: grande capacidade de carga; adequado para grandes distâncias; elevada eficiência energética; alto custo de implantação; baixo custo de transporte; baixo custo de manutenção; possui maior segurança em relação ao modal rodoviário, uma vez que ocorrem poucos acidentes, furtos e roubos; transporte lento devido as suas operações de carga e descarga; pouco poluente.

2.3.1 Trilhos

Segundo Leal (2006), citado por Sartori (2010), trilhos são vigas longas de aço, resistentes ao desgaste, choques e ações mecânicas, com forma ou perfil especial sobre o qual trafegam e são guiadas as rodas do equipamento de tração (locomotivas) e do material rodante rebocado (carros e vagões).

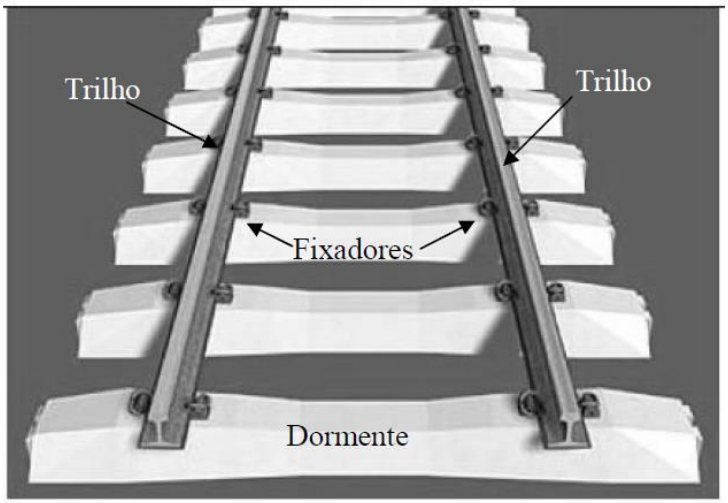
Os trilhos são assentados sobre os dormentes e transferem para estes as solicitações do material rodante da via. Possuem ainda a função de sustentação e condução dos trens, apresentando características estruturais de uma viga extensa e contínua. (ROSA, 2008)

Segundo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) o trilho constitui o elemento fundamental da estrutura da via permanente e deve cumprir os seguintes propósitos:

- Resistir diretamente às tensões que recebe do trem e transmiti-las aos outros elementos que compõem a estrutura da via;
- Realizar a orientação das rodas dos veículos ferroviários, em seu movimento; e
- Servir de condutor da corrente elétrica para a sinalização e à tração nas linhas eletrificadas.

A figura 23 ilustra alguns elementos básicos da via permanente:

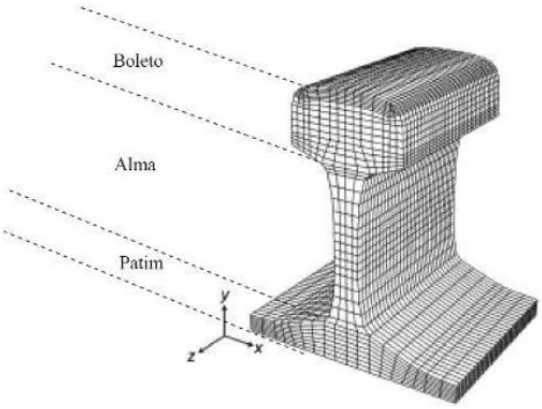
Figura 23 - Elementos básicos da via permanente



Fonte: Rosa (2008)

O perfil utilizado atualmente em trilhos ferroviários é o do tipo Vignole, composto por boleto, alma e patim e definido pela ABNT NBR 7590 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1991), segundo figura 24.

Figura 24 - Elementos do trilho Vignole



Fonte: Skyttebol (2005) ilustrado por Sartori (2010)

2.3.2 Soldagem Aluminotérmica

A solda Thermit® foi inventada em 1898 e patenteada por Hans Goldschmidt em 1903 (data de publicação) pela empresa Goldschmidt AG, na Alemanha. (BOUZAN, 2016)

A soldagem aluminotérmica possui aplicação específica onde outros processos não apresentam necessária flexibilidade para a realização em campo. Devido à sua relativa simplicidade e independência de fontes externas de energia, a aluminotermia se consagrou

como um dos métodos mais empregados na soldagem de trilhos ferroviários na via férrea. (ROSA, 2008).

Segundo o DNIT, os problemas relacionados ao transporte de trilhos de grandes comprimentos e dilatação térmica dos mesmos foram solucionados com o uso das técnicas de soldagem aluminotérmica no campo. As vantagens de trilhos soldados são muitas, entre as quais:

- A vida útil dos trilhos aumenta em até 30%;
- Os gastos em conservação da via podem diminuir em até 50%;
- Redução do número de repartições dos trilhos, especialmente espaços nas articulações;
- Diminuição da resistência ao rolamento; e
- Aumenta da duração dos dormentes.

Trata-se de um processo de soldagem por fusão no qual dois metais juntam-se depois de serem aquecidos por metal superaquecido que experimentou uma reação aluminotérmica. O metal líquido que resulta da reação entre um óxido metálico e alumínio atua como o metal de enchimento. Este processo exotérmico foi descoberto em 1898, na Alemanha, pelo Dr. Hans Goldschmidt da Goldschmidt AG. (SCHWARTZ, 1993, p.835-838).

A figura 25 representa a reação química e sua geração de calor:

Figura 25 - Equação química soldagem aluminotérmica

$$FE_2O_3 + 2AL \circledR 2FE + AL_2O_3 \text{ (HEAT } \circledR \text{ 850 KJ)}$$

Fonte: Schwartz (1993, p.835-838).

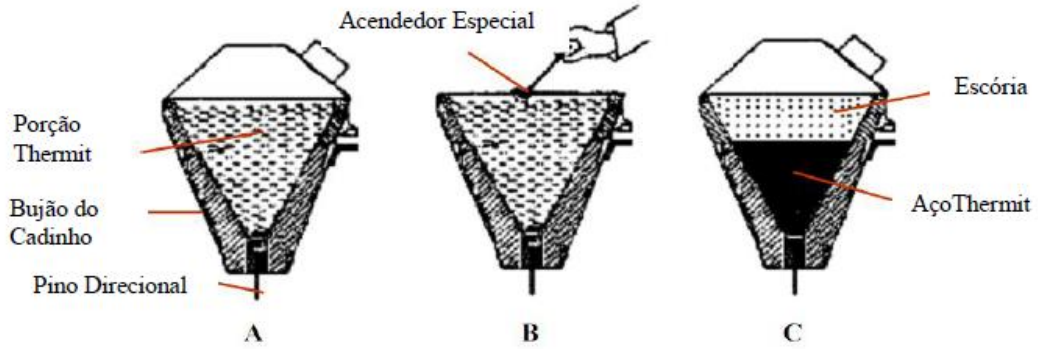
Esta reação exotérmica é extremamente forte se apenas o óxido metálico e o agente redutor de alumínio forem usados. Ferro-liga é adicionado para arrefecer esta reação de uma temperatura típica de 3090 ° C (5600 ° F) para 2480 ° C (4500 ° F). Essas adições também são usadas para produzir a química desejada. A quantidade de liga adicionada é muito crítica, porque quantidades maiores arrefecerão a reação a temperaturas inferiores a 2040 ° C (3700 ° F), momento em que a separação escória / metal pode ser incompleta. (SCHWARTZ, 1993, p.835-838).

Denomina-se mistura o conjunto de elementos, em forma de pó, responsáveis pela reação aluminotérmica. A mistura é composta de aproximadamente 25% de alumínio e o restante de magnetita e ferro-liga que produzirão, após combustão, aproximadamente 70% de aço líquido.

Esse aço representa aproximadamente a metade da mistura original, em peso, e um terço do volume. (ROSA, 2008)

A mistura é colocada em um cadinho especial que possui abertura em sua parte inferior, como mostra a figura (A). Após efetuada a ignição da reação com um acendedor especial, esta se torna autossustentável tomando conta de toda a mistura (B). Ao término da reação, devido à diferença de densidade entre o óxido de alumínio e o metal produzido, ocorre a separação gravimétrica entre ambos, com o metal liquefeito na base do cadinho e a escória de óxido de alumínio sobrenadando este metal (C). (SARTORI, 2010). As etapas são demonstradas na figura 26:

Figura 26 - Etapas da soldagem aluminotérmica



Fonte: Bacarence (2000) retirado de Sartori (2010)

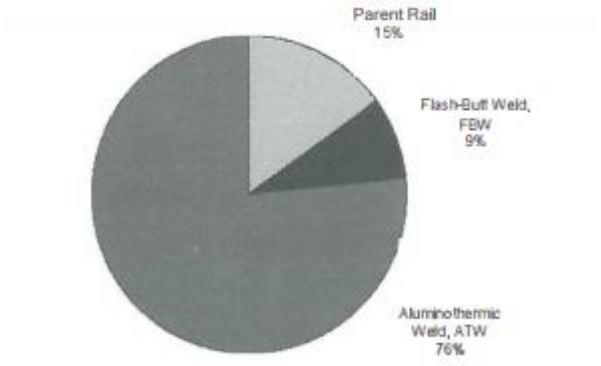
2.3.3 Fraturas em Soldas Aluminotérmicas

De acordo com Mutton (2004) citado Rosa (2008) devido a sua estrutura de metal fundido, a solda possui propriedades mecânicas inferiores as do trilho. No entanto, são os parâmetros de soldagem em conjunto que determinam estas propriedades. O exame do procedimento de soldagem deve abordar a distribuição de dureza ao longo da solda, limpeza do metal de solda, propriedades mecânicas como resistência à tração e fadiga, além das características metalúrgicas da solda.

A incidência de quebras ferroviárias afeta consideravelmente as operações ferroviárias e é considerada como um indicador da qualidade geral da pista. Uma quantidade significativa de dinheiro é, portanto, gasta na detecção de defeitos do trilho, a fim de evitar quebras. (SAWLEY E REIFF R., 2000) citado por (MUTTON, 2004).

A distribuição de todas as quebras de trilhos de acordo com a posição, para o período 2001-2004, é mostrada na Figura 27. As soldas aluminotérmicas são o contribuinte mais significativo para quebras de trilhos. (MUTTON, 2004).

Figura 27 - Distribuição das quebras de trilhos por posição



Fonte: Mutton (2005)

As fraturas transversais estão associadas a defeitos da linha central da solda, principalmente devido à contração do aço solidificado quando o pré-aquecimento da junta é deficiente. A falha vertical, ainda, ocorre na alma, coincidindo com uma larga zona de fusão ou inclusões de escória. (ROSA, 2008)

As fraturas horizontais iniciam na alma, geralmente em um canto do colar de solda e está associada a defeitos superficiais, trincas de contração e inclusões. (ROSA, 2008)

Segundo Lawrence (2014), 40% de todas as falhas de serviço são devidas a soldas aluminotérmicas e 10% de todos os descarrilamentos são devido a essas soldas que quebraram.

2.3.4 Defeitos em Soldas Aluminotérmicas

Segundo Branco (1986) citado por Rosa (2008) os defeitos de soldagem são classificados pelo International Institute of Welding em função de sua natureza, forma e dimensões.

A classificação abrange dois grupos: defeitos planares e defeitos não-planares, cujos tipos estão representados na figura 28.

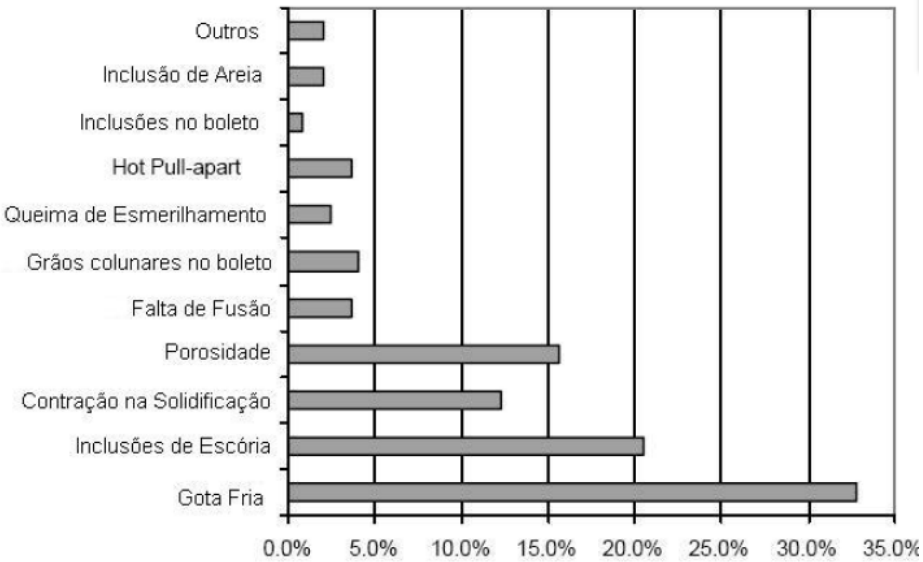
Figura 28 - Tipos de defeitos em soldas

Defeitos Não-Planares	Porosidade
	Inclusões
Defeitos Planares	Trincas
	Defeitos de forma (sulcos, mordeduras, concavidades na raiz)
	Defeitos diversos não incluídos nos anteriores

Fonte: Rosa (2008)

Os defeitos na junta aluminotérmica soldada foram estudados por Lawrence (2004) e citados por Rosa (2008) e estão representados na figura 29.

Figura 29 - Defeitos de soldas aluminotérmicas e recorrência



Fonte: Rosa (2008)

Alguns defeitos são causados por procedimentos de soldagem ou material de consumo inadequados, como black-role, inclusões de escória ou areia e bordamento da solda. Outros são gerados por parâmetros de soldagem incorretos como: rechupes, solda fria e segregação. Ocorrem, ainda, variações no perfil da solda, geradas por severas condições de serviço, que também são interpretadas como defeitos. (ROSA, 2008)

3 APLICAÇÃO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA

Este capítulo se destina a descrever os passos do planejamento de Taguchi, descritos no subtópico 2.2.11, aplicados ao processo de soldagem aluminotérmica da Vale S.A.

3.1 Visão geral do produto ou processo

O processo de soldagem possui inúmeras vantagens, dentre as quais aumentar a vida útil dos trilhos, reduzir os gastos com conservação da via e reduzir o número de repartições dos trilhos, especialmente espaços nas articulações, conforme levantado pelo DNIT (subtópico 2.3.3).

A soldagem aluminotérmica (subtópico 2.3.2), foi um processo que se consagrou devido à flexibilidade de poder ser realizado em campo (ROSA, 2008). Além disso, o problema de transporte de trilhos longos e de dilatação térmica dos trilhos pôde ser resolvido, razões pelas quais esse processo merece atenção e foi escolhido para ser estudado com o intuito de gerar soldas de alta performance.

3.2 Identificação do problema, formulação e classificação

Conforme visto na revisão bibliográfica (subtópico 2.3.4), as soldas apresentam propriedades inferiores às do trilho devido à sua estrutura de metal fundido (MUTTON, 2004) citado por (ROSA, 2008). Dessa forma, as regiões soldadas são propícias a defeitos que, submetidos a determinadas condições, podem levar a quebras dos trilhos prejudicando as operações ferroviárias, a exemplo da ocorrência de descarrilhamentos e possibilidade de acidentes que podem levar a consequências catastróficas.

Devido às questões levantadas, a empresa Vale S.A., através de reuniões estratégicas com os especialistas da UFJF, identificou que o problema das falhas dos trilhos poderia ser melhor investigado de forma a entender as melhores condições as quais o processo de soldagem poderia acontecer para que a probabilidade de ocorrência de defeitos no produto final fosse minimizada.

3.3 Identificação dos parâmetros de processo (fatores) e interações de interesse

Utilizando as técnicas de brainstorming e reuniões estratégicas com profissionais multidisciplinares (equipe da UFJF e a equipe da Vale designada para o projeto), foram levantados três fatores como os principais influenciadores no processo de soldagem aluminotérmica, ou seja, cuja variação nos níveis foi considerada de maior impacto para as propriedades das soldas geradas. São esses:

1. Tempo de pré-aquecimento: refere-se ao período de tempo em que as extremidades dos trilhos são aquecidas utilizando o maçarico no processo da soldagem. Após ser montado o molde para iniciar a soldagem, é acoplado também um sistema de aquecimento que tem o intuito de evitar a solidificação imediata da solda quando ela tocar nas partes internas do molde ou no trilho e também para retirar qualquer umidade existente no conjunto. Esse procedimento é feito antes mesmo de inserir a mistura que, pela reação exotérmica, dará origem à solda. O tempo de pré-aquecimento influencia na temperatura final atingida pelo molde e trilho.
2. GAP ou abertura: refere-se ao espaçamento entre as extremidades dos trilhos que receberá o material usado como enchimento no processo de soldagem (material de adição).
3. Carbono equivalente: refere-se ao teor de carbono (%) e de outros componentes de liga na composição química de um aço, fornecendo informação de suscetibilidade de formação de trincas induzidas por hidrogênio. Através do carbono equivalente, consegue-se ter uma noção da temperabilidade do aço que, quanto maior, confere maior a dureza e maior probabilidade de formação de trincas. (MACIEL, 2012) citado por (BOUZAN, 2016).

3.4 Selecionar níveis e alcance do fator

Levando em consideração as medidas já empregadas pela VALE S.A. e descritas em seus procedimentos, foram feitas discussões com os especialistas da soldagem aluminotérmica acerca dos níveis máximo e mínimo que os fatores levantados deveriam variar nas experimentações para que o processo fosse investigado. Foi importante considerar níveis

dentro das especificações permitidas para a atividade, mas que, ao mesmo tempo, apresentassem espaçamento tal que provocasse mudança na resposta obtida.

Optou-se por trabalhar em dois níveis para cada fator, devido à suficiência para o trabalho (níveis mínimo e máximo) e à praticidade em relação às ferramentas de análise estatística empregada. Os níveis escolhidos podem ser representados no quadro 2, a seguir:

Quadro 2 - Níveis dos fatores escolhidos para investigação

	FATORES	INFERIOR (-)	SUPERIOR (+)
A	Tempo de Pré-aquecimento	5 minutos	7 minutos
B	GAP	23 mm	27 mm
C	Carbono Equivalente	<1,0%	>1,2%

Fonte: a autora

3.5 Escolher o arranjo ortogonal

Cada fator empregado apresentou 2 níveis e, consequentemente, 1 grau de liberdade, o que resultou em 3 graus de liberdade para todos os fatores empregados com seus respectivos níveis. Foi empregado, nesse caso, o fatorial completo, mas é uma sugestão para trabalhos futuros o emprego dos arranjos e gráficos ortogonais de Taguchi (L4) para organização dos experimentos. O fatorial completo empregado nos experimentos é ilustrado no quadro 3, onde A, B e C correspondem à Tempo de Pré-Aquecimento, GAP e Carbono Equivalente, respectivamente.

Quadro 3 - Fatorial completo empregado nos experimentos

RUN	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fonte: a autora, baseado nos dados dos experimentos feitos.

3.6 Preparação para o experimento e operação

Para conferir maior fidedignidade e garantir uma estimativa mais precisa do efeito de um fator no resultado obtido, foram executadas repetições nos experimentos e esse trabalho fez a análise de duas delas, ou seja, 8 experimentos (4 experimentos com 2 repetições cada).

As soldas foram feitas em campo, na área do Estaleiro de Soldas da Estrada de Ferro Carajás-EFC, em São Luiz/MA, para que as condições de experimentação fossem equivalentes às normais de execução do processo de soldagem aluminotérmica.

Conforme cronograma elaborado pela equipe de projeto e, devido à quantidade de soldas a serem realizadas, o experimento foi dividido em dois momentos diferentes: em um primeiro, foram executados 4 experimentos, com suas respectivas réplicas (8 experimentos, no total) e em um segundo momento, os experimentos restantes (demais 8). A ordem de execução dos primeiros ensaios experimentais foi sorteada e o mesmo se repetiu para a execução de suas repetições, garantindo a aleatoriedade dos experimentos. Apesar da divisão em duas etapas a equipe de operação da VALE empregada nos dois momentos foi a mesma, eliminado a reproducibilidade. (BOUZAN, 2016)

Os trilhos utilizados no processo foram disponibilizados pelo Estaleiro de Soldas e os kits de soldagem pela área de materiais da Vale S.A.

Segue cronograma dos experimentos feitos nos dois momentos (figuras 30 e 31):

Figura 30 - Cronograma dos experimentos feitos no primeiro momento

SOLDA	EXPERIMENTO	TEMPO DE PRÉ AQUECIMENTO (A)	GAP(B)	CARBONO EQUIVALENTE (C)
S01	2	7 min	23 mm	< 1
S02	5	5 min	23 mm	> 1.2
S03	3	5 min	27 mm	< 1
S04	8	7 min	27 mm	> 1.2
S05	3	5 min	27 mm	< 1
S06	8	7 min	27 mm	> 1.2
S07	2	7 min	23 mm	< 1
S08	5	5 min	23 mm	> 1.2

Fonte: A autora. Base em (BOUZAN, 2016)

Figura 31 - Cronograma dos experimentos feitos no segundo momento

SOLDA	EXPERIMENTO	TEMPO DE PRÉ AQUECIMENTO (A)	GAP(B)	CARBONO EQUIVALENTE (C)
S09	1	5 min	23 mm	< 1
S10	7	5 min	27 mm	> 1.2
S11	4	7 min	27 mm	< 1
S12	6	7 min	23 mm	> 1.2
S13	1	5 min	23 mm	< 1
S14	7	5 min	27 mm	> 1.2
S15	4	7 min	27 mm	< 1
S16	6	7 min	23 mm	> 1.2

Fonte: A autora. Base em (BOUZAN, 2016)

4 RESULTADOS

4.1 Resultados Obtidos Para Dureza

Foram utilizadas 8 soldas do total de 16 trabalhadas para o ensaio de dureza. As escolhidas, cada qual sob uma condição experimental, foram:

S01:

- Experimento 2;
- Tempo de pré-aquecimento (A): 7min;
- GAP (B): 23 mm;
- Carbono equivalente (C): < 1;

S03:

- Experimento 3;
- Tempo de pré-aquecimento (A): 5min;
- GAP (B): 27 mm;
- Carbono equivalente (C): <1;

S02:

- Experimento 5;
- Tempo de pré-aquecimento (A): 5min;
- GAP (B): 23 mm;
- Carbono equivalente (C): >1.2;

S04:

- Experimento 8;
- Tempo de pré-aquecimento (A): 7min;
- GAP (B): 27 mm;
- Carbono equivalente (C): >1.2;

S09:

- Experimento 1;
- Tempo de pré-aquecimento (A): 5min;

- GAP (B): 23 mm;
- Carbono equivalente (C): <1;

S011:

- Experimento 4;
- Tempo de pré-aquecimento (A): 7min;
- GAP (B): 27 mm;
- Carbono equivalente (C): <1;

S012:

- Experimento 6;
- Tempo de pré-aquecimento (A): 7min;
- GAP (B): 23 mm;
- Carbono equivalente (C): >1.2;

S014:

- Experimento 7;
- Tempo de pré-aquecimento (A): 5min;
- GAP (B): 27 mm;
- Carbono equivalente (C): >1.2;

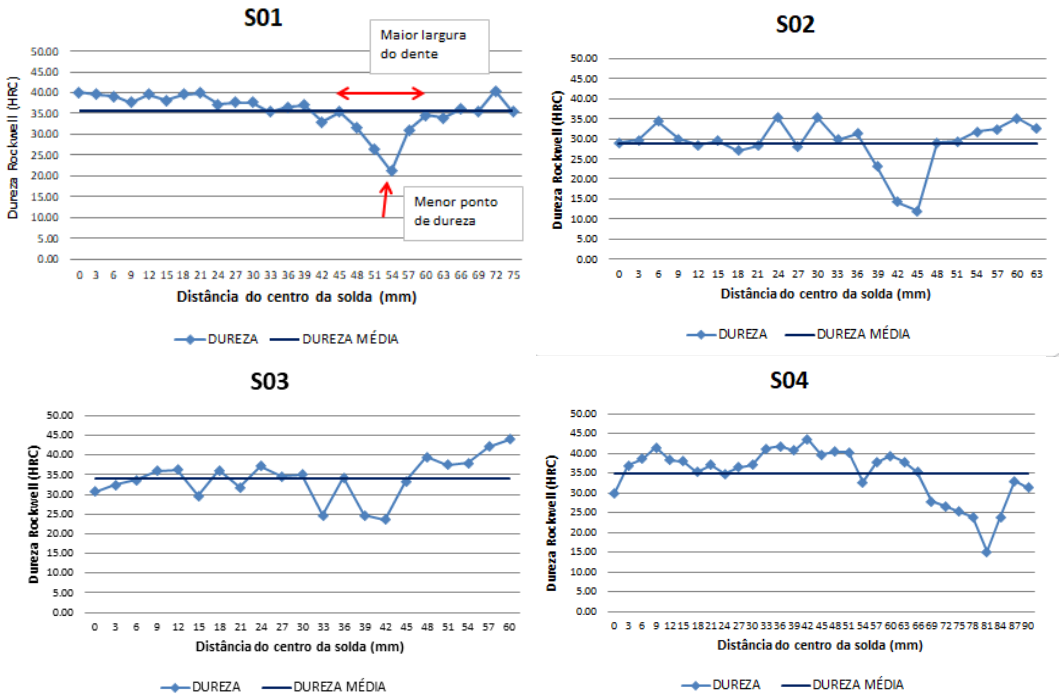
A análise realizada foi acerca da dureza dos trilhos. A dureza é um dos fatores que conferem ao trilho a possibilidade de atuar como superfície de rolamento e suporte das cargas transportadas pelos veículos. Regiões com menor dureza são mais propícias ao desgaste vertical ou perda da área do boleto o que pode levar a fraturas nos trilhos. Por isso a importância da análise e verificação das condições que conferem aos trilhos melhores propriedades.

Foi realizado o ensaio Rockwell para a dureza (de penetração). Esse método foi proposto pelas indústrias Rockwell, nos Estados Unidos, por volta de 1922, e é o método mais utilizado internacionalmente. Como indicador da medida de dureza, a metodologia se baseia na profundidade de impressão causada por um penetrador sob a ação de uma carga. O número da dureza é acompanhado pela nomenclatura HR. Para as análises do presente trabalho, foram realizadas medições da dureza na superfície do boleto (entre 3 e 9 mm da superfície), na região de abrangência da ZTA (Zona Termicamente Afetada). A solda foi cortada

longitudinalmente e foram feitas medições de 3 mm em 3 mm (horizontalmente) a partir do extremidade da solda (corte) ,sendo varridos , portanto, vários pontos da ZTA em sua extensão.

Para avaliar as medidas de dureza, através de brainstorming foi definido que seriam utilizados dois parâmetros de medição. O primeiro é o “Menor Ponto de Dureza” (em mm), ou seja, o valor mínimo da dureza encontrado em cada uma das soldas em questão. O segundo, por sua vez, consistiu em somar a maior quantidade de pontos em que a dureza ficou abaixo da média para aquela respectiva solda, a chamada “Maior Largura do Dente” (em unidades). Para isso, calculou-se a diferença entre cada medida de dureza e a média de todas as medidas, somando-se, posteriormente, a maior sequência de valores negativos. Os gráficos que representam a análise de dureza para cada solda (figuras 32 e 33), em que se pode observar o menor ponto de dureza e a maior largura do dente, bem como a tabela com os resultados obtidos para as métricas adotadas (figura 34) são representados a seguir:

Figura 32 - Ensaio de dureza- Gráficos de dureza para as soldas S01, S02, S03 e S04



Fonte: a autora

Figura 33 - Ensaio de dureza- Gráficos de dureza para as soldas S12, S09, S11 e S14

Fonte: a autora

Figura 34 - Resultado das medições para os menores pontos de dureza e maiores larguras do dente das soldas

SOLDA	MENOR PONTO (mm)	MAIOR LARGURA DO DENTE (un)
S01	21.17	8
S02	12	3
S03	23.67	3
S04	15.17	8
S09	20.67	9
S11	24.83	8
S12	23.5	4
S14	17	4

Fonte: a autora

4.2 Análise Dos Resultados Obtidos

Foi adotado para análise o Fatorial Completo, pois, devido ao baixo número de fatores e réplicas realizadas, essa configuração tornou-se viável. Alinhado a isso, era de interesse da equipe investigar a influência de todos os fatores e interações no experimento. De posse desses dados, foi realizada a Análise de Variância para o fatorial completo através do software

MiniTab 2017, a um nível de significância (α) de 5% (intervalo de confiança de 95%). Os resultados obtidos estão demonstrados nos esquemas 1 e 2.

Esquema 1 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento, GAP e carbono equivalente para Menor Ponto de Dureza

Factorial Fit: Menor versus Tempo Proc; GAP; Carb Equiv

Estimated Effects and Coefficients for Menor (coded units)

Term	Effect	Coef
Constant		19,751
Tempo Proc	2,832	1,416
GAP	0,832	0,416
Carb Equiv	-5,668	-2,834
Tempo Proc*GAP	-3,168	-1,584
Tempo Proc*Carb Equiv	2,003	1,001
GAP*Carb Equiv	-2,497	-1,249
Tempo Proc*GAP*Carb Equiv	-3,498	-1,749

Analysis of Variance for Menor (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	81,673	81,673	27,224	*	*
Tempo Proc	1	16,046	16,046	16,046	*	*
GAP	1	1,386	1,386	1,386	*	*
Carb Equiv	1	64,241	64,241	64,241	*	*
2-Way Interactions	3	40,561	40,561	13,520	*	*
Tempo Proc*GAP	1	20,066	20,066	20,066	*	*
Tempo Proc*Carb Equiv	1	8,020	8,020	8,020	*	*
GAP*Carb Equiv	1	12,475	12,475	12,475	*	*
3-Way Interactions	1	24,465	24,465	24,465	*	*
Tempo Proc*GAP*Carb Equiv	1	24,465	24,465	24,465	*	*
Residual Error	0	*	*	*		
Total	7	146,699				

Fonte: a autora

Esquema 2 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento, GAP e carbono equivalente para Maior Largura do Dente

Factorial Fit: Larg Dent versus Tempo Proc; GAP; Carb Equiv

Estimated Effects and Coefficients for Larg Dent (coded units)

Term	Effect	Coef
Constant		5,875
Tempo Proc	2,250	1,125
GAP	-0,250	-0,125
Carb Equiv	-2,250	-1,125
Tempo Proc*GAP	2,250	1,125
Tempo Proc*Carb Equiv	0,250	0,125
GAP*Carb Equiv	2,750	1,375
Tempo Proc*GAP*Carb Equiv	-0,750	-0,375

Analysis of Variance for Larg Dent (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	20,3750	20,3750	6,7917	*	*
Tempo Proc	1	10,1250	10,1250	10,1250	*	*
GAP	1	0,1250	0,1250	0,1250	*	*
Carb Equiv	1	10,1250	10,1250	10,1250	*	*
2-Way Interactions	3	25,3750	25,3750	8,4583	*	*
Tempo Proc*GAP	1	10,1250	10,1250	10,1250	*	*
Tempo Proc*Carb Equiv	1	0,1250	0,1250	0,1250	*	*
GAP*Carb Equiv	1	15,1250	15,1250	15,1250	*	*
3-Way Interactions	1	1,1250	1,1250	1,1250	*	*
Tempo Proc*GAP*Carb Equiv	1	1,1250	1,1250	1,1250	*	*
Residual Error	0	*	*	*		
Total	7	46,8750				

Fonte: a autora

Foram analisadas 8 soldas (2^3= 8 experimentos) e, utilizando-se os três fatores na análise, tem-se um valor observado para cada condição experimental. Assim sendo, a variação total é somente a soma da variância devido aos efeitos principais e de interação. Nessas situações, o grau de liberdade para o erro é igual a zero e a variância do erro também é zero. Isso faz com que a taxa F fique indefinida também, já que envolve a variância do erro. Nesses casos, como sugere Antony e Kaye (2000) pode-se realizar um agrupamento de efeitos insignificantes. Isso permite com que se obtenha uma variância para o erro. Segundo Taguchi, citado por Antony e Kaye (2000) o agrupamento deve começar por aqueles fatores ou interações de menos significância para o experimento e continuar até que os graus de liberdade do erro sejam iguais à metade dos graus de liberdade do experimento, aproximadamente. Ainda segundo os mesmos autores, para experimentos industriais são mais usualmente estudados os efeitos de fatores principais e de interações de dois fatores. Como consequência, optou-se por atribuir os efeitos da interação de três fatores (ABC) para o erro, o que gerou as ANOVAs dos esquemas 3 e 4:

Esquema 3 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento, GAP e carbono equivalente para Menor Ponto de Dureza sem interação de três fatores.

Factorial Fit: Menor versus Tempo Proc; GAP; Carb Equiv

Estimated Effects and Coefficients for Menor (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		19,751	1,749	11,29	0,056
Tempo Proc	2,832	1,416	1,749	0,81	0,567
GAP	0,832	0,416	1,749	0,24	0,851
Carb Equiv	-5,668	-2,834	1,749	-1,62	0,352
Tempo Proc*GAP	-3,168	-1,584	1,749	-0,91	0,531
Tempo Proc*Carb Equiv	2,003	1,001	1,749	0,57	0,669
GAP*Carb Equiv	-2,497	-1,249	1,749	-0,71	0,605

Analysis of Variance for Menor (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	81,673	81,673	27,224	1,11	0,587
Tempo Proc	1	16,046	16,046	16,046	0,66	0,567
GAP	1	1,386	1,386	1,386	0,06	0,851
Carb Equiv	1	64,241	64,241	64,241	2,63	0,352
2-Way Interactions	3	40,561	40,561	13,520	0,55	0,729
Tempo Proc*GAP	1	20,066	20,066	20,066	0,82	0,531
Tempo Proc*Carb Equiv	1	8,020	8,020	8,020	0,33	0,669
GAP*Carb Equiv	1	12,475	12,475	12,475	0,51	0,605
Residual Error	1	24,465	24,465	24,465		
Total	7	146,699				

Fonte: a autora

Esquema 4 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento, GAP e carbono equivalente para Maior Largura do Dente sem interação de três fatores.

Factorial Fit: Larg Dent versus Tempo Proc; GAP; Carb Equiv

Estimated Effects and Coefficients for Larg Dent (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		5,875	0,3750	15,67	0,041
Tempo Proc	2,250	1,125	0,3750	3,00	0,205
GAP	-0,250	-0,125	0,3750	-0,33	0,795
Carb Equiv	-2,250	-1,125	0,3750	-3,00	0,205
Tempo Proc*GAP	2,250	1,125	0,3750	3,00	0,205
Tempo Proc*Carb Equiv	0,250	0,125	0,3750	0,33	0,795
GAP*Carb Equiv	2,750	1,375	0,3750	3,67	0,170

Analysis of Variance for Larg Dent (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	20,3750	20,3750	6,7917	6,04	0,289
Tempo Proc	1	10,1250	10,1250	10,1250	9,00	0,205
GAP	1	0,1250	0,1250	0,1250	0,11	0,795
Carb Equiv	1	10,1250	10,1250	10,1250	9,00	0,205
2-Way Interactions	3	25,3750	25,3750	8,4583	7,52	0,260
Tempo Proc*GAP	1	10,1250	10,1250	10,1250	9,00	0,205
Tempo Proc*Carb Equiv	1	0,1250	0,1250	0,1250	0,11	0,795
GAP*Carb Equiv	1	15,1250	15,1250	15,1250	13,44	0,170
Residual Error	1	1,1250	1,1250	1,1250		
Total	7	46,8750				

Fonte: a autora

Através desse agrupamento, o erro adquiriu uma variância, porém, em relação à variância total, esse valor foi inexpressivo (para Menor Ponto de Dureza 24,465 versus 146,699 e, para Maior Largura do Dente, 1,1250 versus 46,8750). O mesmo pode-se dizer comparando-se os graus de liberdade (1 versus 7, para ambos os casos) . Segundo Antony e Kaye (2000), o aumento dos graus de liberdade do erro aumenta o nível de confiança dos fatores significantes. Assim sendo, optou-se por atribuir também o efeito do fator GAP para o erro, visto que era o fator menos significante em ambos os casos. Este apresentou o menor ou igual efeito dentre os demais fatores ou interações (0,832 para Menor Ponto de Dureza e -0,250 para Maior Largura do Dente), a menor soma de quadrados (1,386, para Menor Ponto de Dureza e 0,1250 para Maior Largura do Dente) e, consequentemente, menor taxa F, que mensura o efeito de cada fator ou interação em relação ao erro (0,06, para Menor Ponto de Dureza e 0,11 para Maior Largura do Dente).

Além disso, os p-valores obtidos foram todos acima do valor pré-estabelecido α=5% O p-valor é a probabilidade, sob H0 (hipótese nula), de ocorrência do valor particular observado para a estatística de teste ou de valores mais extremos. A probabilidade de significância de um teste mede a força da evidência contra H0 em uma escala numérica. Se rejeitamos H0, significa que aceitamos a hipótese alternativa, ou seja, a pesquisada ou investigada no modelo, e que os dados fornecem evidências de que há efeitos presentes. Sendo assim, é necessário que os valores encontrados sejam o mais próximos ou inferiores ao nível de significância. Como, nesse caso, os p-valores ficaram muito distantes de 0,05, de acordo com a ANOVA, não há fatores significantes para o resultado, sendo que o GAP (p-valor=0,795) foi o mais insignificante entre eles.

As novas análises geradas são mostradas a seguir (esquemas 5 e 6):

Esquema 5 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente para Menor Ponto de Dureza com interação entre eles.

Factorial Fit: Menor versus Tempo Proc; Carb Eq

Estimated Effects and Coefficients for Menor (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		19,751	1,351	14,62	0,000
Tempo Proc	2,832	1,416	1,351	1,05	0,354
Carb Eq	-5,667	-2,834	1,351	-2,10	0,104
Tempo Proc*Carb Eq	2,003	1,001	1,351	0,74	0,500

Analysis of Variance for Menor (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	80,287	80,287	40,144	2,75	0,177
Tempo Proc	1	16,046	16,046	16,046	1,10	0,354
Carb Eq	1	64,241	64,241	64,241	4,40	0,104
2-Way Interactions	1	8,020	8,020	8,020	0,55	0,500
Tempo Proc*Carb Eq	1	8,020	8,020	8,020	0,55	0,500
Residual Error	4	58,392	58,392	14,598		
Pure Error	4	58,392	58,392	14,598		
Total	7	146,699				

Fonte: a autora

Esquema 6 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente para Maior Largura do Dente com interação entre eles.

Factorial Fit: Larg Dent versus Tempo Proc; Carb Eq

Estimated Effects and Coefficients for Larg Dent (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		5,875	0,9100	6,46	0,003
Tempo Proc	2,250	1,125	0,9100	1,24	0,284
Carb Eq	-2,250	-1,125	0,9100	-1,24	0,284
Tempo Proc*Carb Eq	0,250	0,125	0,9100	0,14	0,897

Analysis of Variance for Larg Dent (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	20,2500	20,2500	10,1250	1,53	0,321
Tempo Proc	1	10,1250	10,1250	10,1250	1,53	0,284
Carb Eq	1	10,1250	10,1250	10,1250	1,53	0,284
2-Way Interactions	1	0,1250	0,1250	0,1250	0,02	0,897
Tempo Proc*Carb Eq	1	0,1250	0,1250	0,1250	0,02	0,897
Residual Error	4	26,5000	26,5000	6,6250		
Pure Error	4	26,5000	26,5000	6,6250		
Total	7	46,8750				

Fonte: a autora

Como tal análise engloba apenas dois fatores, seriam necessários apenas quatro experimentos (2^2) e, como foram executados todos os oito, puderam-se considerar duas réplicas nas análises. O erro ficou agora com 4 graus de liberdade e com uma variância significativa em relação à

variância total (58,392 versus 146,699 para Menor Ponto de Dureza e 26,5000 versus 46,8750 para Maior Largura).

No entanto, conforme já dito, o aumento dos graus de liberdade do erro aumenta o nível de confiança dos fatores significantes, além de que os p-valores obtidos ainda não revelam fatores significantes para o modelo, visto que todos são superiores ao valor pré-estabelecido (α=5%). Dessa forma, foi gerada uma nova ANOVA com os dois fatores (tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente), esquemas 7 e 8, considerando a interação entre eles como erro e acrescentando, consequentemente, mais um grau de liberdade ao mesmo (agora, com 5 graus de liberdade). A opção pela interação vem do fato de que ela era a menos significante dentre os fatores, com p-valor de 0,5 para Menor Ponto de Dureza e 0,897 para Maior Largura do Dente.

Esquema 7 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente para Menor Ponto de Dureza sem interação entre eles.

Factorial Fit: Menor versus Tempo Proc; Carb Eq

Estimated Effects and Coefficients for Menor (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		19,751	1,289	15,33	0,000
Tempo Proc	2,832	1,416	1,289	1,10	0,322
Carb Eq	-5,667	-2,834	1,289	-2,20	0,079

S = 3,64451 PRESS = 170,015
R-Sq = 54,73% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 36,62%

Analysis of Variance for Menor (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	80,287	80,287	40,144	3,02	0,138
Tempo Proc	1	16,046	16,046	16,046	1,21	0,322
Carb Eq	1	64,241	64,241	64,241	4,84	0,079
Residual Error	5	66,412	66,412	13,282		
Lack of Fit	1	8,020	8,020	8,020	0,55	0,500
Pure Error	4	58,392	58,392	14,598		
Total	7	146,699				

Fonte: a autora

Esquema 8 - ANOVA dos fatores tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente para Maior Largura do Dente sem interação entre eles.

Factorial Fit: Larg Dent versus Tempo Proc; Carb Eq

Estimated Effects and Coefficients for Larg Dent (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		5,875	0,8159	7,20	0,001
Tempo Proc	2,250	1,125	0,8159	1,38	0,226
Carb Eq	-2,250	-1,125	0,8159	-1,38	0,226

S = 2,30760 PRESS = 68,16
R-Sq = 43,20% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 20,48%

Analysis of Variance for Larg Dent (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	20,2500	20,2500	10,1250	1,90	0,243
Tempo Proc	1	10,1250	10,1250	10,1250	1,90	0,226
Carb Eq	1	10,1250	10,1250	10,1250	1,90	0,226
Residual Error	5	26,6250	26,6250	5,3250		
Lack of Fit	1	0,1250	0,1250	0,1250	0,02	0,897
Pure Error	4	26,5000	26,5000	6,6250		
Total	7	46,8750				

Fonte: a autora

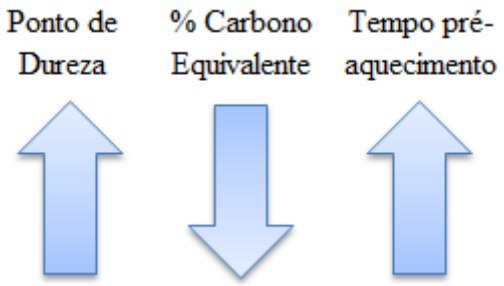
A partir da análise das últimas ANOVA geradas, percebeu-se que o Carbono Equivalente para a variável resposta Menor Ponto de Dureza apresentou um p-valor (0,079) satisfatório, ou seja, mais próximo ao valor pré-estabelecido, embora ainda não pudesse ser considerado totalmente significante para o resultado. O R^2 obtido foi de 54,73%, ou seja, o modelo matemático encontrado explica 54,73% do resultado obtido, sendo que o restante dos fatores influenciadores nos menores pontos de dureza da solda não foram contemplados pelo presente modelo, ou seriam necessárias mais amostras para sustentá-lo. Porém, as modificações feitas na ANOVA foram necessárias para gerar um modelo que explicasse da melhor forma, mesmo que não integral, o efeito dos fatores na dureza das soldas. O modelo encontrado para Menor Ponto de Dureza, baseando-se nos coeficientes mostrados pela ANOVA, foi:

- MP=19,751+1,461X1- 2,834 X2, sendo MP= menor ponto de dureza, X1= tempo de pré-aquecimento e X2= percentual de carbono equivalente.

Pode-se inferir, através dessa fórmula, que o carbono equivalente (efeito= -5,667 e coeficiente= -2,834) apresenta aproximadamente o dobro de influência nos vales de dureza se comparado ao tempo de pré-aquecimento (efeito=2,832 e coeficiente=1,461). Além disso, o efeito do carbono equivalente é inversamente proporcional (negativo), significando que o

coeficiente precisa assumir o menor valor para aumentar o resultado (maximizar o menor ponto de dureza), ou ainda que menores porcentagens de carbono equivalente (<1%) geram melhores resultados de dureza, ao passo que maiores tempos de pré-aquecimento (7 min), variável diretamente proporcional, geram os melhores resultados de dureza. A figura 35 ilustra a relação existente entre os fatores % de carbono equivalente e tempo de pré-aquecimento para a variável resposta menor Ponto de Dureza:

Figura 35 - Relação entre a variável resposta menor Ponto de Dureza e seus fatores de influência



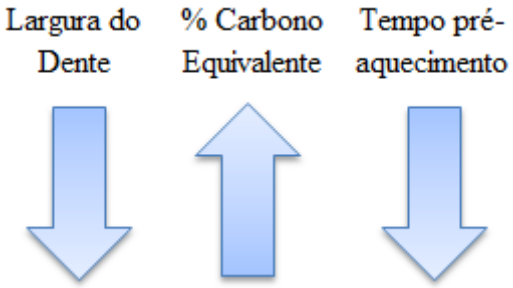
Fonte: a autora

Já com relação à variável resposta Maior Largura do Dente, os p-valores obtidos foram equivalentes para carbono equivalente e tempo de pré-aquecimento (ambos 0,226) e o R^2 mostrou que o modelo explica 43,20% do resultado obtido, sugerindo que demais fatores ou réplicas que influenciariam no modelo não foram abordadas. Mas uma vez, os aperfeiçoamentos foram necessários para gerar um modelo que conseguisse levantar alguns fatores de influência na dureza das soldas. O modelo encontrado para maior largura do dente foi:

- LD=5,875+ 1,125X1- 1,125X2, sendo LD=maior largura do dente, X1= tempo de pré-aquecimento e X2= percentual de carbono equivalente.

Assim, da mesma forma que para a variável resposta anterior, a influência do carbono equivalente é negativa, porém, nesse caso, o coeficiente negativo diz que o fator precisa assumir o maior valor para minimizar o resultado (obter menores larguras do dente), ou seja, o maior percentual de carbono (>1,2%) gera melhores resultados para largura do dente, ao passo que para o tempo de pré-aquecimento, variável diretamente proporcional, quanto menor o valor (5 min), menor a largura do dente. Da mesma forma que a variável resposta anterior, segue figura (18) que ilustra a relação existente entre os fatores % de carbono equivalente e tempo de pré-aquecimento agora para a variável resposta Maior Largura do Dente:

Figura 36 - Relação entre a variável resposta Maior Largura do Dente e seus fatores de influência



Fonte: a autora

5 CONCLUSÃO

Foi aplicada a metodologia do Fatorial Completo e Análise de Variância para estimar os efeitos dos fatores Tempo de Pré-Aquecimento, GAP e Carbono Equivalente na variável resposta dureza no processo de soldagem de trilhos. Foram adotados dois métodos de medição: menor ponto de dureza nas soldas e maior largura do dente (medida em pontos) em que a dureza ficou abaixo da média para cada solda. Percebeu-se que o percentual de carbono equivalente e tempo de pré-aquecimento são fatores de influência na dureza das soldas, com destaque para o percentual de carbono equivalente, que influenciou ambos os critérios adotados para medição da dureza, fato em conformidade com os resultados obtidos pela literatura. Para que o ponto de dureza não seja minimizado, segundo o modelo (R^2=54,73%), os fatores tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente devem operar em seu maior e menor nível, respectivamente (7 min e <1%). Já para que a largura do dente não seja ampliada, o modelo (R^2=43,20%) indica que o tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente devem operar em seu menor e maior nível, respectivamente (5 min e >1,2%). Percebe-se que, para as duas variáveis-resposta escolhidas, os níveis ótimos dos fatores foram diferentes, sendo necessária a análise do que é mais significativo se obter como resposta em cada experimento para escolha dos níveis mais adequados. O modelo encontrado não consegue explicar todos os resultados obtidos, mas conseguiu revelar fatores de importância na dureza das soldas.

O estudo bibliográfico sugeriu o emprego da metodologia de Taguchi para o Planejamento de Experimentos, porém, devido ao número de fatores e níveis empregados nesse experimento serem reduzidos possibilitando, sem nenhuma complicação, o emprego do fatorial completo e, além disso, devido ao tempo limitado para conclusão do presente trabalho, decidiu-se seguir com o fatorial completo. Entretanto, uma sugestão de trabalho futuro é o emprego da metodologia de Taguchi, conforme descrito, para realização do Planejamento de Experimentos, comprovando a eficácia e praticidade dessa metodologia .

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023:** informação e documentação - referências - elaboração. Rio de Janeiro, 2002a.

_____. **NBR 6027:** informação e documentação - sumário - apresentação. Rio de Janeiro 2003a.

_____. **NBR 6028:** informação e documentação - resumo - apresentação. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR 7599**: trilho com defeito. Rio de Janeiro. 1982.

_____. **NBR 10520:** informação e documentação - citações em documentos - apresentação. Rio de Janeiro, 2002b.

_____. **NBR 12225**: informação e documentação - lombada - apresentação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 14724:** informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação. Rio de Janeiro, 2002c.

AHMAD, Sufizar. **Optimisation of Sintering Parameters of Titanium Alloy Foams Using Taguchi Method for Improved Electrical Conductivity**. International Conference on Robust Quality Engineering, Malásia, 2013.

ALVES **Utilização do método de Taguchi na modelagem e otimização de vazios relacionados à solidificação em processos de fundição de aço**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Campus Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2009.

ALVES, M. F. **ABC da Metrologia Industrial.** ISEP- Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2003. Disponível em <http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/PubDid/ABC_Metro.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2017.

AMIN, MUHAMAD e JAMALUDIN. **Dynamic Response Optimization for Cemented Carbide Injection Molding**. International Conference on Robust Quality Engineering, Malásia, 2013.

ANTONY e KAYE **Experimental Quality. A strategic approach to achieve and improve quality.** 1.ed. 2000.

BITONDO, Ciro et al. **Friction-stir welding of AA 2198 butt joints:** mechanical characterization of the process and of the welds through DOE analysis. Itália: Int J Adv Manuf Technol. 2010, p.505-511.

BOUZAN **Efeito das variáveis de processo na qualidade de soldas aluminotérmicas em trilhos ferroviários.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

BRUNA, NOMAKSTEINSKY **Potentiality and Benefits of Robust Engineering and the Techonological Experimentation in the Steel Industry.** La metallurgia italiana, Itália, nov-dez 2008.

RIBEIRO, Rosinei B. et al. **Aplicação do Método Estatístico de Taguchi no Processo de Usinagem em Aços ABNT 1045.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, nov/2002. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2002.

CASTRO **Método de Taguchi: Controlo de Qualidade com Recurso Não-Convencional ao Desenho Estatístico de Experiências (DOE).** Instituto Português de Administração de Marketing (IPAM), Lisboa. Disponível em: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/ A4REN23%20(7).PDF>

CICMAC **Conceito de Metrologia.** Disponível em: < www.inmetro.rs.gov.br/cicmac/ material_didatico/polig_conceito_metrologia.pdf >. Acesso em: 18 jun. 2017.

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Especificação Técnica do Serviço. ETS-010:** Soldagem Aluminotérmica. Disponível em: < file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/ETS%20-%20010%20-%20Soldagem%20Aluminot %C3%A9rmica%20(5).pdf>. Acesso em: 14 jun. 2017.

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Especificação Técnica de Material. ETS-005:** Solda Aluminotérmica. Disponível em:< file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/ETS%20-%20005%20-%20Corte%20de% 20Trilhos%20(1).pdf >. Acesso em: 14 jun. 2017.

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES PIM- **Procedimento para inspeção de material.** Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/download/ferrovias/consulta-publica/101-pim-trilho.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2017.

JUNG, C. F. **Metodologia científica**: ênfase em pesquisa tecnológica. 2004. Disponível em: <http://www.jung.pro.br/moodle/course/view.php?id=9>. Acesso em: 09 mai 2010.

JURKÓW; STIERNSTEDT **Investigation of High Temperature Co-fired Ceramics sintering conditions using Taguchi Design of the experiment.** Ceramics International 40, 2014. p.10447-10455.

KARABAS **Biodisel production from crude acorn (Quercus frainetto L.) kernel oil:** an optimisation process using the Taguchi method. Renewable Energy, v.53, 2013, p.384-388. Sakarya University School of Arifiye, Sakarya, Turquia, 2012.

KESHTELI, AMINNAYERI e GHOMI **Integrated scheduling of production and rail transportation.** Computers & Industrail Engineering, v.74, 2014, p.240-256. Department of Industrial Engineering and Management Systems, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2014.

LAWRENCE, CHEN e CYRE **Improving the Fatigue Resistance of Thermite Railroad Rail Weldments.** Apresentação. Disponível em <http://fcp.mechse.illinois.edu/files/2014/07/ Lawrence-presentation.pdf> Acesso em: 14 jun. 2017.

LAWRENCE, CYRE e BARKAN **Improved Reliability of Thermite Field Welds Used on High Speed Rail Lines.** Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 24. University of Illinois at Urbana, 2003.

LIMA JUNIOR. **Unidade I- Fundamentos de Metrologia.** IF-UFRGS, 2012. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/fis1258/index_arquivos/TXT_01.pdf> Acessado em: 18/06/2017

LIRA; ALARCON **Seleção de esmaltes cerâmicos utilizando um delineamento experimental segundo Taguchi.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132004000400005>. Acesso em: 02 jul. 2017.

MACÊDO, F. B. **Estudo do desgaste em trilhos ferroviários.** Monografia. UFJF, 2009.

MACEDO, M.L.K. et al. **Avaliação mecânica e metalúrgica em trilho ferroviário utilizado em via contínua.** Jornadas SAM-CONAMET-AAS. UFRGS, 2001

MIGUEL, P. A. C. (org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MONTGOMEY; RUNGER **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**, 6.ed., c.13-14, p.306-371, 2016.

MUTTON; ALVAREZ; MCLEOD **Rail Requirements for 40 tonne Axle Loads.** 8th International Heavy Haul Conference, 2005. Disponível em <file:///C:/Users/ USUARIO/Downloads/IHHA2005_Duvel%20(2).pdf >. Acesso em: 15 jun. 2017.

FIOD NETO, M. **Taguchi e a melhoria da qualidade: uma releitura crítica.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997.

SIQUEIRA, Ângela Deuse; SILVA, Messias Borges; SILVA NETO José Teófilo de Moraes e. **Uso do método de Taguchi no Processo de Retificação de Álcool Residual.** Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep1998_art131.pdf>. Acesso em: 14 set. 2016.

OZCELIK **Optimization of injection parameters for mechanical properties of specimens with weld line of polypropylene using Taguchi method**. International Communications in Heat and Mass Transfer, v.38, 2011, p.1067-1072. Gebze Institute of Technology, Gebze-Kocaeli, Turquia, 2011.

PEDRONI **Análise de falhas das fraturas de trilhos:** o caso da ferrovia do aço. Monografia. Instituto Militar de Engenharia (IME), 2008.

PETENATE **Utilização do Método de Taguchi na Redução dos Custos de Projetos**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <file:///C:/ Users/USUARIO/Downloads/PETENATE%20(6).pdf >. Acesso em: 11 jun. 2017.

PIMENTA, Cristie Diego et al. **Método de Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização.** GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, a.7, n.2, abr-jun/2012, p.97-108.

PORTAL ACTION. **Três princípios básicos de um planejamento de experimentos.** Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/planejamento-de-experimento/introducao> Acesso em 15/11/2017.

Psycology Emory. Disponível em: <http://www.psychology.emory. edu/clinical/bliwise/Tutorials/FACTOR/Factorial/sstotal.ht> Acesso em: 18 jun. 2017.

ROCHA, C. F**. O transporte de cargas para o Brazil e sua importância para a Economia.** Trabalho de Conclusão de Curso. UNIJUI, 2015.

ROSA, J. S. C**. Avaliação da Solda Aluminotérmica em ângulo.** Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2008.

SARTORI, M. **Caracterização mecânica e metalúrgica de soldas aluminotérmicas em trilhos ferroviários.** Trabalho de diplomação. UFRGS, 2010.

SCHWARTZ, B. ASM HANDBOOK. **Welding Brazing and Soldering**, 4.ed., v.6, 1996, p.835- 838.

SIMPSON **Taguchi's Robust Design Method**. IE 466: Concurrent Engineering. Disponível em <http://www.mne.psu.edu/simpson/courses/ie466/ie466.robust.handout.PDF>. Acesso em: 14 set. 2016.

TOKIMATSU, Celso Riyoitsi. **Avaliação da Integridade de Trilhos Ferroviários Soldados por Caldeamento.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Joinville, SC, 2012.

SOUZA; BAGNO **Aplicação do Método de Taguchi em um processo de injeção plástica de itens de segurança automotivos.** Sinapse Múltipla, v.3(1), Jul/2014, p.27-43. PUC Minas, Belo Horizonte, 2002.

SOUZA, V. P. **Manual de elaboração de trabalhos acadêmicos**. Juiz de Fora: Editora UFJF, 2008. Disponível em: <http://www.ufjf.br/biblioteca/servicos-e-produtos/normalizacao-2/>. Acesso em: 09 mai. 2010.

TAGUCHI, CHOWDHURY e YUIN WU. **Taguchi's Quality Engineering Handbook.** Appendix C, p.1601-1617, 2005.

TOTO. **Aplicação do Método de Taguchi em Instituição Pública.** Tese Doutorado. Fundação Getúlio Vargas Escola de Administração de Empresas de São Paulo (FGV/EASP), São Paulo, 2001.

UNISANTA **Soldagem Termítica.** c.3, p.18-21. Disponível em: <http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/capit3.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2017.

VARGHESE; ANNAMALAI. **Optimization of Cutting Parameters using Taguchi method on turning process.** International Conference on Robust Quality Engineering, Malásia, 2013.

YANG. **Life Cycle Reliability Engineering.** Appendix Orthogonal Arrays, Linear Graphs, and Interaction Tables, p.486- 494, 2007.

YEN; LI **Process optimization for Ni (II) removal from wastewater by calcined oyster shell powders using Taguchi method.** Journal of Environmental Management, v.161, 2015, p.344-349. Kao Yaun University, Kaohsiung City 82151, Taiwan, 2015.

YOUSEFIEH; SHAMANIAN; SAATCHI **Optimization of Experimental Conditions of the Pulsed Current GTAW Parameters for Mechanical Properties of SDSS UNS S32760 Welds Based on the Taguchi Design Method.** Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 2011.

ZHANG; WANG; YANG. **Assessing the applicability of the Taguchi design method to an interrill erosion study.** Jornal of Hidrology 521, 2015 p.63-73. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest University, Yangling, Shannxi Province 712100, China, 2014.

ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.
Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.
Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral[1] e criminais previstas no Código Penal[2], além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, _____ de _____ de 20____.

_____	_____
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)	Matrícula
_____	_____
ASSINATURA	CPF

[1] LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.
[2] Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.