INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA METALÚRGICA

PAULA DE MORAES GUIMARÃES

UTILIZAÇÃO DO MSA E FMEA PARA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE UMA ACIARIA ELÉTRICA

Vitória
2021

PAULA DE MORAES GUIMARÃES

UTILIZAÇÃO DO MSA E FMEA PARA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO EM UMA ACIARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Thalmo de Paiva Coelho Junior.

Vitória

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Nilo Peçanha do Instituto Federal do Espírito Santo)

G963u Guimarães, Paula de Moraes.
Utilização do MSA e FMEA para análise da confiabilidade do sistemas de medição em uma aciaria elétrica / Paula de Moraes Guimarães. – 2021.
53 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Thalmo de Paiva Coelho Junior.

Monografia (graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Cursos Superiores em Metalurgia, Curso Superior de Engenharia Metalúrgica, Vitória, 2021.

1. Metalurgia. 2. Aço – Metalurgia. 3. Controle de processos. 4. Processos de fabricação – Controle de qualidade. 5. Usinas siderúrgicas. 6. Engenharia metalúrgica. I. Coelho Junior, Thalmo de Paiva. II. Instituto Federal do Espírito Santo. III. Título.

CDD 21 – 669

Elaborada por Marcileia Seibert de Barcellos – CRB-6/ES - 656

PAULA DE MORAES GUIMARÃES

UTILIZAÇÃO DO MSA E FMEA PARA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO EM UMA ACIARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovado em 05 de abril de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
Thalmo de Paiva Coelho Junior
Data: 19/04/2021 20:08:55-0300
CPF: 757.152.017-72

Prof. Dr. Eng. Thalmo de Paiva Coelho Junior
Instituto Federal do Espírito Santo
Orientador

gov.br Documento assinado digitalmente
Jose Barrozo de Souza
Data: 20/04/2021 20:38:13-0300
CPF: 620.740.167-00

Prof. Dr. José Barrozo de Souza
Instituto Federal do Espírito Santo
(Coordenadoria de Mecânica)

Prof. MS.c. Eng. Guilherme Augusto de Morais Pinto
Instituto Federal do Espírito Santo
(Coordenadoria de Mecânica)

Engª. Janacely Demonier Kill
Grupo Simec

AGRADECIMENTOS

À minha família, minha mãe Josefa e meu irmão Yuri, pelo amor, a compreensão, o amparo, os esforços e ensinamentos durante essa jornada. Essa conquista também é de vocês!

A Deus, por minha saúde e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados.

Ao meu orientador, Prof. Thalmo, pela atenção, incentivo e disponibilidade durante todo o curso e, agora, como meu Orientador. Muito obrigada!

Aos meus amigos, tanto os de longa data quantos aos que o IFES me presenteou, pela amizade e companheirismo ao longo deste percurso.

Ao corpo docente e funcionários do Instituto Federal do Espírito Santo, por toda assistência durante os anos de curso.

Por fim, dedico este trabalho a todos os que me ajudaram ao longo desta caminhada e que tiveram impacto na minha formação acadêmica.

RESUMO

A competitividade e exigências por qualidade e segurança em processos e produtos têm levado as indústrias a buscarem ferramentas que visam a melhoria contínua de seus processos e produtos de forma a garantir o atendimento aos requisitos dos clientes. O presente trabalho tem como objetivo utilizar as ferramentas FMEA e MSA, a fim de se analisar a confiabilidade do sistema de medição aplicado no processo de inspeção de produtos semiacabados de uma indústria siderúrgica, fornecedora do setor automotivo. O FMEA foi aplicado no setor do Lingotamento contínuo, e indicou que o defeito de forma romboidade pode levar a problemas na laminação de tarugos e à defeitos no produto final. Através dessa ferramenta, foram propostas ações para minimização e controle da romboidade, como, por exemplo, os estudos do MSA. Esses estudos foram realizados para avaliar a confiabilidade do sistema de medição empregado, uma vez que são usados instrumentos de medição para inspeção do tarugo com romboidade. Após a conclusão dos estudos, foi possível verificar que não foram detectadas causas especiais, ou seja, causas que não são naturais ao processo de medição, e que o sistema de medição pode ser considerado confiável.

Palavras-chave: FMEA, MSA, Qualidade, Romboidade.

ABSTRACT

Competitiveness and demands for quality and safety in processes and products have led industries to seek tools that aim at the continuous improvement of their processes and products in order to guarantee the fulfillment of customers' requirements. The present work aims to use the tools FMEA and MSA, in order to analyze the reliability of the measurement system applied in the inspection process of semi-finished products of a steel industry, supplier to the automotive sector. The FMEA was applied in the sector of continuous casting, and indicated that the defect of rhomboidity can lead to problems in the rolling of billets and to defects in the final product. Through this tool, actions were proposed to minimize and control rhomboidity, such as, for example, MSA studies. These studies were carried out to evaluate the reliability of the measurement system used, since measurement instruments are used to inspect the billet with rhomboidity. After completing the studies, it was possible to verify that no special causes were detected, that is, causes that are not natural to the quality process, and that the measurement system can be considered reliable.
Keywords: FMEA, MSA, Quality, Rhomboidity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxo esquemático dos processos de produção de aço por usinas Integradas e Semi-Integradas. 13
Figura 2 - Correlação dos conceitos de qualidade, Gestão da Qualidade e seus elementos 16
Figura 3 - Processo de Medição e Fontes de variação 23
Figura 4 - Relação entre tendência e repetitividade 24
Figura 5 - Estabilidade 25
Figura 6 - Tendência (Bias) 26
Figura 7 - Linearidade 27
Figura 8 - Precisão 27
Figura 9 - Repetitividade 28
Figura 10 - Reprodutibilidade 29
Figura 11 - R&R 30
Figura 12 - Graus de romboidade e trincas off-corner em tarugos 35
Figura 13 - Paquímetro Analógico de bico longo 39
Figura 14 - Carta de controle Xbarra-R para o Estudo de Estabilidade 40
Figura 15 - Análise da Linearidade 41
Figura 16 - Relatório gráfico de estudo de R&R 43
Figura 17 - Valores numéricos do estudo de R&R 43

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1 - Causas potenciais de variação em um sistema de medição 22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de Aceitação de erros de Dispersão (R&R)..... 31
Tabela 2 - Matriz de Pesquisa. 33
Tabela 3 - Equipe de projeto..... 34
Tabela 4 - Tabela parcial do FMEA de processo do Lingotamento Contínuo. 37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação do processo de lingotamento contínuo dos aços 15
Quadro 2 - Importância e benefícios dos tipos de FMEA. 20

LISTA DE SIGLAS

FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*

MSA – *Measurement system analysis*

BOF – *The Basic Oxygen Furnace*

EAF – *Electric Arc Furnace*

PIM – *Pátio de Insumos Metálicos*

FEA – *Forno Elétrico a Arco*

FP – *Forno Panela*

ML – *Máquina de Lingotamento*

SGQ – *Sistema de Gestão da Qualidade*

ISO – *International Organization for Standardization*

ABNT – *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

IATF – *International Automotive Task Force*

APQP – *Advanced Product Quality Planning*

PPAP – *Production Part Approval Process*

CEP – *Controle Estatístico do Processo*

SM – *Sistema de Medição*

R&R – *Repetitividade e Reprodutibilidade*

NDC – *Número de Categorias Distintas*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
2 REVISÃO DA LITERATURA 13
2.1 PROCESSOS SIDERÚRGICOS 13
2.2 ACIARIA ELÉTRICA 14
2.2.1 Lingotamento Contínuo 14
2.2.1.1 Defeitos Presentes em Tarugos 15
2.3 QUALIDADE 16
2.4 SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE E ISO 16
2.4.1 ISO 9001 e IATF 16949 17
2.5 FMEA 18
2.6 MSA 20
2.6.1 Fontes de Variação 21
2.6.2 Variação do Processo de Medição 22
2.6.3 Variação de Localização 24
2.6.3.1 Exatidão 24
2.6.3.2 Estabilidade 24
2.6.3.3 Tendência 25
2.6.3.4 Linearidade 26
2.6.4 Variação de Dispersão 27
2.6.4.1 Precisão 27
2.6.4.2 Repetitividade 28
2.6.4.3 Reprodutibilidade 29
2.6.4.4 Repetitividade e Reprodutibilidade (R&R) 30
2.6.5 Critérios de Aceitação 30
2.6.6 Número de Categorias Distintas 31
3 METODOLOGIA 32
3.1 MÉTODO DE PESQUISA 32
3.2 APLICAÇÃO PRÁTICA DA PESQUISA 33
3.2.1 FMEA 33
3.2.2 MSA 33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 34
4.1 FMEA 34

4.2 MSA 38
4.2.1 Estudo de Estabilidade 39
4.2.2 Estudo de Tendência e Linearidade 40
4.2.3 Estudo de R&R 42
5 CONCLUSÃO 45
6 REFERÊNCIAS 47
ANEXOS 50

1 INTRODUÇÃO

As exigências e a competitividade do mercado atual têm levado as indústrias a buscarem ferramentas que visam à melhoria contínua de seus processos e produtos de forma a garantir o atendimento aos requisitos dos clientes. Melhorias em qualidade, estabilidade de processo e redução de custos são premissas fundamentais para as empresas em um espaço tão concorrido.

O setor siderúrgico atua como fornecedor de diversas cadeias produtivas, como a indústria automobilística, construção civil e bens de capital. Desta forma, as demandas por cumprimento de normas específicas para cada cadeia levam as empresas a buscarem modelos de gestão que sejam capazes de assegurar inovação, qualidade e sustentabilidade (COTA e FREITAS, 2013).

No processo produtivo do aço, o lingotamento contínuo é responsável por transformar o aço em sua forma líquida em uma forma sólida contínua. Nesta fase, o aço líquido é resfriado e, neste caso, solidificado em um produto semiacabado, o tarugo.

Durante o processo de lingotamento, diversos defeitos podem ser gerados, afetando a qualidade do produto final. Segundo Rizzo (2006b), estes defeitos podem ser causados por problemas mecânicos ou metalúrgicos. Um defeito de forma comum em tarugos, a romboidade, pode ser detectada por com o uso de instrumentos de medição. Desta forma, medições devem ser realizadas de modo a garantir a liberação ou sucateamento dos tarugos, de acordo com suas tolerâncias.

Para a indústria automobilística, que possui elevado nível de exigência de qualidade e segurança em processos e produtos, normas como a IATF 16949 têm como objetivo certificar que seus fornecedores garantam a isenção de falhas na cadeia de fornecimento (SANTOS, 2006).

A IATF 16949 propõe ferramentas, conhecidas como Core Tools, para a qualidade automotiva. Dentre elas estão o FMEA (Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial) e MSA (Análise do Sistema de Medição) (AIAG, 2020).

O FMEA tem como finalidade identificar e avaliar falhas potenciais e seus efeitos em produtos e processos e, também, apresentar ações que possam reduzir ou eliminar a ocorrência destas falhas (FORD Motor Company, 2011).

O MSA é constituído por um conjunto de técnicas estatísticas que auxilia na avalição da confiabilidade dos dados gerados pelo sistema de medição e na compreensão de

erros e desvios de dados, assim como no desenvolvimento de novos métodos e instrumentos (DALOSTO, 2018).
A maioria dos principais fabricantes e fornecedores automotivos exige o uso de uma ou mais Core Tools como um meio de enfatizar a melhoria contínua e garantir a confiabilidade de processos e produtos (AIAG, 2020).

Assim, o objetivo deste trabalho é utilizar as ferramentas FMEA e MSA, a fim de se analisar a confiabilidade do sistema de medição aplicado no processo de inspeção de produtos semiacabados de uma indústria siderúrgica, como requisito para prosseguir fornecendo para o mercado repositor da indústria automotiva.

Com base neste objetivo geral, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar as ferramentas FMEA e MSA;
- Utilizar a ferramenta FMEA no setor de Lingotamento Contínuo de uma siderúrgica, a fim de conhecer as potenciais falhas do processo e seus efeitos no produto final, bem como propor ações que possam reduzir ou eliminar a ocorrência das falhas;
- Empregar os estudos de Estabilidade, Linearidade e Tendência, Repetitividade e Reprodutibilidade do MSA com auxílio de software estatístico para avaliar a confiabilidade do sistema de medição empregado, uma vez que, nesse setor, são usados instrumentos de medição para inspeção do produto acabado.

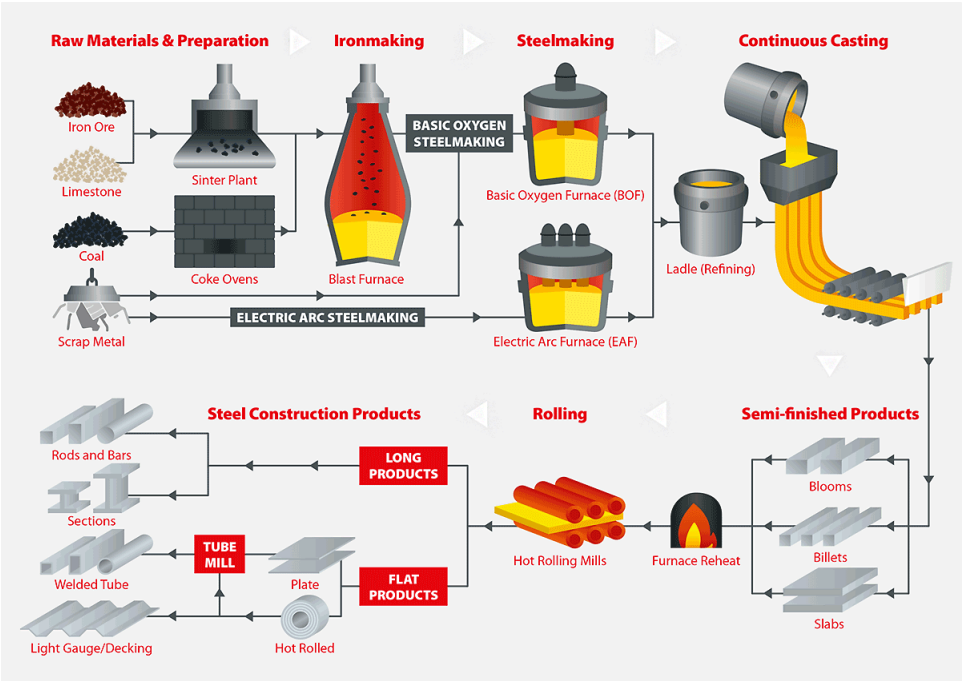
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROCESSOS SIDERÚRGICOS

Largamente utilizado no dia-a-dia, o aço está presente em diversas ocasiões. Produzido através de processos siderúrgicos, possui diversas especificações e formas visando atender diversos setores, desde utilidades domésticas à construção civil, indústria automobilística, agricultura e energia.

Segundo Araújo (1997), a siderurgia é a área de metalurgia responsável pela fabricação e tratamento dos aços. Neste contexto, os processos de fabricação do aço podem ser divididos em dois segmentos: (i) as usinas integradas, onde o aço é obtido a partir da redução do minério de ferro a ferro metálico (ferro gusa), seguido do refino e ajuste de residuais através de convertedores à oxigênio (BOF) e (ii) as usinas semi-integradas, que consiste na fusão e refino da carga metálica, composta de sucata de ferro e ferro gusa (EAF). A Figura 1 ilustra o fluxograma destes processos siderúrgicos de fabricação do aço por usinas integradas e semi-integradas.

FIGURA 1 – Fluxo esquemático dos processos de produção de aço por usinas Integradas e Semi-Integradas.



Fonte: New Steel Construction (Acesso em 11/06/2020).

2.2 ACIARIA ELÉTRICA

As etapas que constituem o processo de fabricação de aço por uma aciaria elétrica são o Pátio de Insumos Metálicos (PIM), Forno Elétrico a Arco (FEA), Forno Panela (FP) e Máquina de Lingotamento (ML).

No PIM, os insumos metálicos, como ferro gusa e sucatas, são estocados de forma a otimizar o processo de confecção das cargas a serem utilizadas, que variam com o tipo de aço a ser produzido. Em seguida, no FEA, a carga metálica e os fundentes passam pela etapa de fusão, seguida do refino primário e retirada de escória. O aço bruto é, então, vazado em uma panela e transportado para o forno panela, onde são realizadas as operações de refino secundário.

O refino secundário é descrito por Rizzo (2006a) como as operações necessárias para ajuste da composição química final do aço, homogeneização, desoxidação, dessulfuração e controle de sua temperatura por aquecimento, visando maior controle operacional do FEA à ML.

O processo é continuado conduzindo a panela ao lingotamento, responsável pela transformação do aço líquido em um produto sólido. O produto final desta etapa depende do tipo de lingotamento adotado, sendo os mais comuns o lingotamento convencional e lingotamento contínuo, onde, este último é o mais amplamente utilizado.

2.2.1 Lingotamento Contínuo

O lingotamento contínuo tem como principal objetivo transformar o aço em sua forma líquida em uma forma sólida contínua. Foi desenvolvido visando-se eliminar os dispendiosos laminadores desbastadores e a aumentar o rendimento de produtos de aço (RIZZO, 2006b).

Nesta fase, o aço líquido é resfriado em três etapas sequenciais: (i) resfriamento primário, que ocorre em um molde refrigerado à água, (ii) resfriamento secundário, constituído por conjuntos de sprays combinados de água e ar e, (iii) ao ar, geralmente em leitos de resfriamento, por transferência de calor por radiação.

O produto final do lingotamento contínuo é a matéria-prima da laminação. O Quadro 1 mostra a classificação do processo de lingotamento considerando-se o tipo final do produto a ser laminado.

Quadro 1 – Classificação do processo de lingotamento contínuo dos aços.

Produto Laminado	Matéria-Prima Gerada no Lingotamento Contínuo
Produto Plano	Placa (slab)
	Placa fina (thin slab)
	Tira ou chapa fina (strip)
Produto não-plano ou longo	Bloco (bloom)
	Tarugo (billet)
	Pré-forma (blank)

Fonte: Rizzo (2006b)

Cada produto possui dimensões específicas para sua classificação. No caso de produtos longos, o produto final denominado tarugo pode ser redondo, de diâmetro máximo de 150mm, ou de seção quadrada, variando entre 100mm e 150mm.

2.2.1.1 Defeitos Presentes em Tarugos

Diversos defeitos podem ser gerados no lingotamento contínuo do aço, afetando a qualidade do produto final. Estes defeitos podem ser divididos em defeitos de forma, dimensionais, superficiais e internos.

Os defeitos superficiais mais comuns, em tarugos, são incrustação de escória ou refratário, risco, pele dupla, trinca na face, trinca em aresta, gota fria e pin hole (microvazios). Geralmente, são defeitos eliminados por escarfagem manual ou esmerilhamento (RIZZO,2006b).

Defeitos internos geralmente são provenientes de deformações na estrutura bruta de solidificação. Os mais comuns são blowholes, macro e microinclusões, trincas “off-corner”, trincas centrais e diagonais (ROSA FILHO, 2013).

Os defeitos dimensionais e de forma são detectados de forma visual, por inspeções realizadas e, por vezes, com o uso de instrumentos de medição (RIZZO,2006b). Os defeitos mais comuns em tarugos são variação de comprimento, empenos, torção e romboidade. A romboidade, um defeito de forma comum em blocos e tarugos, é a diferença entre as diagonais da seção transversal. O defeito é resultado da perda do contato da pele solidificada com a parede interna do molde, gerando um gap de ar, que interfere na transferência de calor.

2.3 QUALIDADE

O conceito de qualidade evoluiu ao longo dos anos, de melhorias localizadas a transformar-se em uma valiosa ferramenta de estratégia. Oakland (1994), definiu qualidade como o “atendimento das exigências do cliente”.

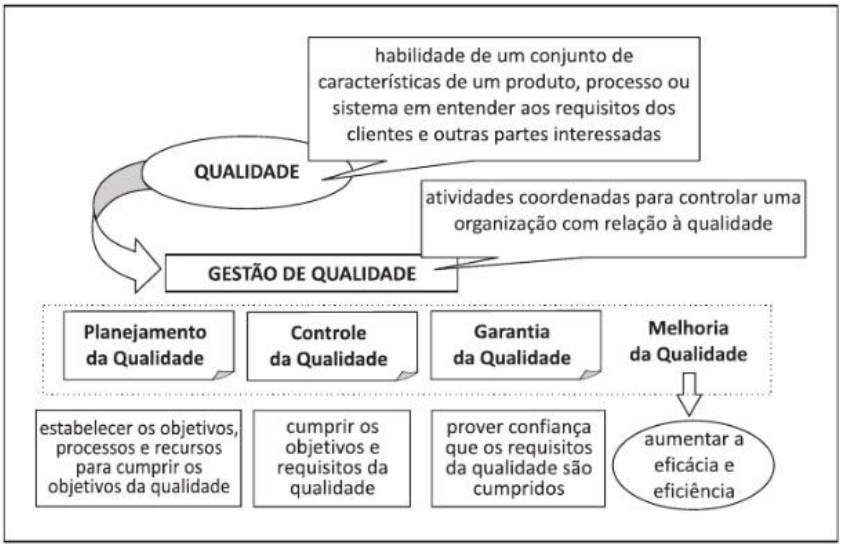
A qualidade tornou-se um fator de mercado. Sendo considerada um dos elementos fundamentais da gestão, passou a fazer parte do conjunto de decisões estratégicas das organizações. Virou uma vantagem competitiva, onde clientes que buscam segurança nos processos e produtos buscam por qualidade técnica, associada a preços competitivos (LOBO, 2020).

Desta forma, o conceito de qualidade é ampliado, aumentando sua importância nas tomadas de decisão no que diz respeito a sobrevivência de uma organização.

2.4 SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE E ISO

O Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) é um sistema que estabelece políticas e objetivos para direcionamento e controle de uma organização, condizente à qualidade. A Figura 2 mostra a inter-relação dos conceitos de qualidade, Gestão da Qualidade e seus elementos, considerando que o planejamento, controle, garantia e melhoria da qualidade são atividades presentes na organização.

Figura 2 – Correlação dos conceitos de qualidade, Gestão da Qualidade e seus elementos.



Fonte: CARVALHO e PALADINI (2012)

Com relação à implementação e os benefícios gerados de um SGQ, podem ser consideradas duas categorias: interna e externa. Quando consideradas motivações internas, os benefícios estão associados ao aumento da eficiência operacional, redução de falhas, aperfeiçoamento interno organizacional e redução de custos. Com base em motivações externas, é possível verificar benefícios como melhoria da credibilidade, aumento na competitividade e aumento da satisfação do cliente (BRAVI et al. 2019).

Considerando a complexidade no processo de melhoria contínua da qualidade, diversas ferramentas e metodologias são utilizadas na indústria em diferentes fases do ciclo produtivo, como 5W2H, Benchmarking, Padronização, Diagrama de Ishikawa, Lean Manufacturing e Seis Sigma (FAESARELLA, 2006).

Mediante à expansão da globalização, a International Organization for Standardization (ISO), foi criada em 1947 com o intuito de unificar e facilitar a coordenação dos padrões industriais. Para a área de Gestão da Qualidade foi criada a série 9000, que regulamenta os fundamentos e o vocabulário do Sistema de Gestão da Qualidade. Esta série é composta pelas normas ISO 9001, ISO 9004 e ISO 19011.

2.4.1 ISO 9001 e IATF 16949

Segundo a ABNT, a ISO 9001 compreende os requisitos para os Sistema de Gestão da Qualidade. Esta norma tem como finalidade atender a garantia da qualidade interna e externa. Na garantia de qualidade externa, os requisitos a serem utilizados pelo fornecedor em seu sistema de gestão de qualidade, visam atender eficazmente os requisitos do cliente assim como aumentar seu nível de satisfação e confiança. Já a garantia de qualidade interna, proporciona ao fornecedor verificar a melhoria contínua de suas operações e processo (CARVALHO e PALADINI, 2012).

O setor da indústria automotiva possui condições particulares para a aplicação de normas de qualidade. Devido ao elevado nível de exigência do setor, a série de normas ISO 9000 foi considerada insuficiente para garantir a isenção de falhas na cadeia de fornecimento, levando a categoria a elaborar requisitos complementares para seus fornecedores (SANTOS, 2006). A quantidade de requisitos, porém, acabou por gerar diferentes normas pelas montadoras, o que dificultava o processo de atendimento pelos fornecedores.

Diante disso, foi necessário unificar as normas específicas. Desenvolvida pela Força Tarefa Automotiva Internacional (International Automotive Task Force, do inglês IATF) a ISO/TS 16949 que, em 2016, tornou-se a IATF 16949, tem o objetivo de estimular a melhoria contínua da cadeia de suprimentos e da certificação, visando à prevenção de defeitos e redução de variações de processo.

Os membros do IATF incluem grandes fabricantes de veículos e suas associações comerciais como BMW Group, Ford Motor Company, General Motors e AIAG (U.S), VDA (Germany). De fato, a certificação na IATF 164949 é requisito obrigatório dos fabricantes automotivos para a comercialização dos produtos do setor (IATF, 2020).

As principais ferramentas da IATF constituem as chamadas core tools, em português “ferramentas essenciais”, para a qualidade automotiva são: APQP (Planejamento Avançado da Qualidade do Produto), PPAP (Processo de Aprovação de Peça de Produção), FMEA (Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial), MSA (Análise do Sistema de Medição), CEP (Controle Estatístico do Processo) e Plano de Controle (AIAG, 2020).

2.5 FMEA

O termo falha pode ser definido como o “Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida” (ABNT, 1994, p.3).

Segundo Pereira (2019), o termo falha pode ser utilizado quando um equipamento não desempenha suas funções de forma esperada. Assim, a falha pode apresentar descontinuação na operação, diminuição e interrupção da produção, bem como perda de qualidade do produto. Portanto, a análise de falhas se faz necessária quanto à melhoria contínua dos processos produtivos.

A detecção das falhas na fase inicial, sua criticidade e riscos decorrentes, têm impactos financeiros nas companhias. A alteração um projeto pode decidir o futuro competitivo de uma empresa e, a tomada de decisões em fase inicial reduz a chance de problemas relativos, por exemplo, a custo e questões de segurança (DALOSTO, 2018).

FMEA (FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS), em português, Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos, é uma ferramenta que objetiva reconhecer e avaliar falhas potenciais e seus efeitos em produtos e processos, assim como identificar ações que possam reduzir ou eliminar a ocorrência de falhas, e documentar o

processo (FORD Motor Company, 2011). De acordo com a ABNT (1994, p.14) o FMEA é entendido como:

> “Método qualitativo de análise de confiabilidade que envolve o estudo dos modos de panes que podem existir para cada subitem, e a determinação dos efeitos de cada modo de pane sobre os outros subitens e sobre a função requerida do item”.

Segundo LAURENTI (2020), o FMEA deve revisado a atualizado, de forma a acompanhar o desenvolvimento do processo ou produto a fim de garantir a estimulação da melhoria contínua.

O FMEA possui quatro principais tipos, de acordo Stamatis (1995), categorizados de acordo com o objetivo do estudo a ser realizado:

1. FMEA de Sistema (System FMEA): utilizado para analisar sistemas no estágio inicial de concepção do projeto;
2. FMEA de Produto (Design FMEA): utilizado no desenvolvimento de um novo produto antes que seja liberado para confecção;
3. FMEA de Processo (Process FMEA): utilizado para analisar as falhas causadas por processos de fabricação e montagem;
4. FMEA de Serviço (Service FMEA): utilizado para analisar serviços antes que alcancem o consumidor.

Segundo Sant`Anna e Júnior (2010) a execução de um FMEA pode ser realizada, basicamente, em quatro etapas:

1. Planejamento: fase onde são aplicadas as metodologias e abrange a identificação do escopo, com a formação do grupo de trabalho e o planejamento da agenda de trabalho e a preparação da documentação.
2. Análise das Falhas Potenciais: fase onde se identificam os modos de falha conhecidos e potenciais, os efeitos de cada modo de falha, as possíveis causas dos modos de falha, assim como os controles atuais.
3. Avaliação dos Riscos: definem-se os índices de severidade (S), ocorrência (O), detectabilidade (D) dos modos de falhas, que são usados para calcular os índices de prioridade de risco (R).

4. Melhorias: estágio onde são definidas as medidas para a eliminação ou redução dos modos de falha. Posteriormente, são analisadas quanto a sua viabilidade, e definidas as que serão implantadas.

Ganhos em custo relacionados a retrabalhos e manutenção, aumento da qualidade e confiabilidade do processo e/ou produto e satisfação do cliente são alguns dos benefícios da utilização do FMEA (MELO, 2017). O Quadro 2 mostra a importância e os benefícios dos tipos de FMEA.

Quadro 2 – Importância e benefícios dos tipos de FMEA

<table>
<tr><th></th><th>Sistema</th><th>Projeto</th><th>Processo</th><th>Serviço</th></tr>
<tr><td rowspan="7">Os benefícios de se utilizar um FMEA</td><td>Ajuda a selecionar a melhor alternativa de projeto de sistema.</td><td>Estabelece uma prioridade de ações de melhoria de projeto.</td><td rowspan="2">Identifica as deficiências no processo e oferece um plano de ações corretivas.</td><td>Auxilia na análise dos fluxos de trabalho.</td></tr>
<tr><td>Ajuda a determinar a redundância.</td><td>Fornece informações para ajudar através da verificação do projeto do produto e testes.</td><td>Auxilia na análise dos sistemas e/ou processos .</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ajuda na definição da base para os procedimentos de diagnóstico em nível de sistema.</td><td>Ajuda a identificar as características críticas ou significativas.</td><td rowspan="2">Identifica as características críticas e/ou significativas e ajuda o desenvolvimento dos planos de controle.</td><td>Identifica as deficiências das tarefas.</td></tr>
<tr><td>Auxilia na avaliação dos requerimentos de projeto e alternativas.</td><td rowspan="2">Identifica as tarefas críticas ou significativas e ajuda no desenvolvimento dos planos de controle.</td></tr>
<tr><td>Aumenta a probabilidade de que os problemas potenciais sejam considerados.</td><td>Ajuda a identificar e eliminar os problemas potenciais de segurança.</td><td>Estabelece uma prioridade de ações corretivas.</td></tr>
<tr><td>Identificam as falhas potenciais do sistema e sua interação com outros sistemas ou subsistemas.</td><td>Ajuda a identificar antecipadamente as falhas, nas fases de desenvolvimento do produto.</td><td>Auxilia na análise dos processos de manufatura e montagem.</td><td>Estabelece uma prioridade para as ações de melhorias.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Documenta as razões para as mudanças.</td></tr>
</table>

Fonte: DALOSTO (2018)

Atualmente, além de ser requisito da norma IATF 16949 para a indústria automobilística, o FMEA também é utilizado em diversos setores como a indústria química e petroquímica, alimentícia, desenvolvimento de softwares, assim como nas áreas médica e administrativa (LAURENTI, 2010).

2.6 MSA

Um Sistema de Medição (SM) é caracterizado por reunir instrumentos, softwares e dispositivos de medição, assim como normas e padrões, pessoal e ambiente, que são utilizados para mensurar a unidade de medição (QUARESMA et al., 2018).

O Measurement System Analysis (MSA), em português, Análise dos Sistemas de Medição, é um conjunto de técnicas estatísticas que permite avaliar a confiabilidade

dos dados gerados pelo sistema de medição e são empregadas a fim de determinar se o SM satisfaz os requisitos de controle de qualidade. Tem como objetivo, avaliar se operadores diferentes, ou métodos diferentes, produzem o mesmo resultado, quando são aplicadas as mesmas metodologias e recursos (WATSON, PETRIE, 2010).

O MSA contribui para a compreensão dos erros e desvios de dados, assim como qualquer fonte causadora do erro na medição proposta, possibilitando a melhoria do processo de medição, bem como o desenvolvimento de novos métodos e instrumentos (DALOSTO, 2018).

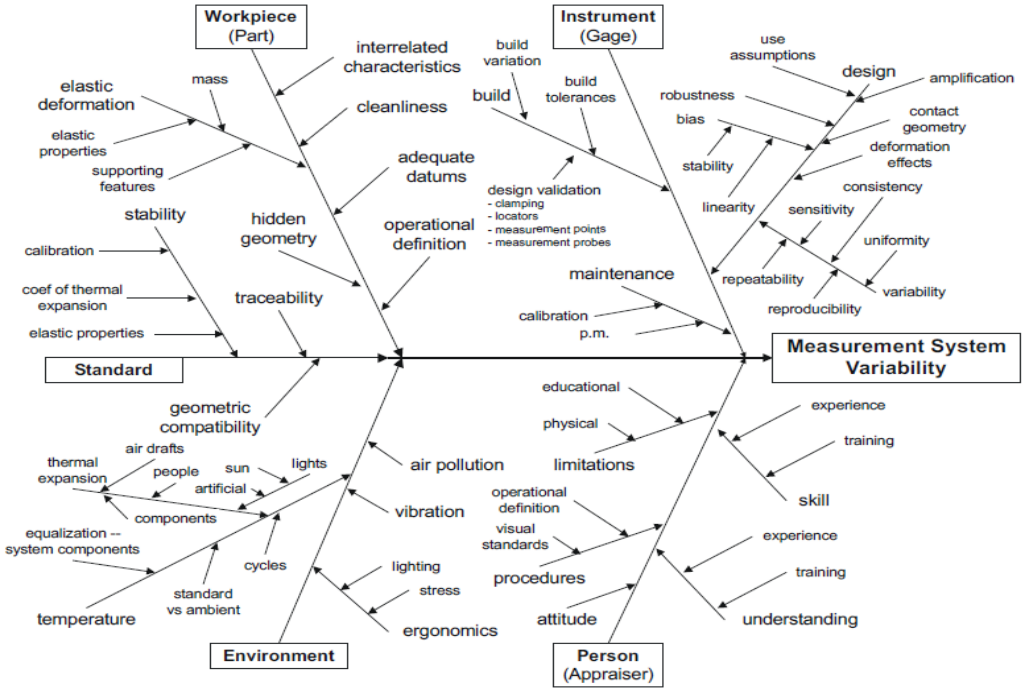
2.6.1 Fontes de Variação

O Sistema de Medição é impactado por ambas as fontes de variação, aleatórias e sistemáticas, que são devido a causas comuns e especiais. De acordo com o manual de referência do MSA (2010), para controlar a variação em um sistema de medição:

1. Identificar as fontes potenciais de variação e,
2. Eliminar, sempre que possível, ou monitorar essas fontes de variação.

Embora causas especiais dependam da situação, causas comuns podem ser identificadas. Para isso, alguns métodos podem ser utilizados para categorizar as fontes de variação, sendo um exemplo o Diagrama de Causa e Efeito. O Diagrama 1 apresenta algumas causas potenciais de variação em um sistema de medição.

Diagrama 1 - Causas potenciais de variação em um sistema de medição



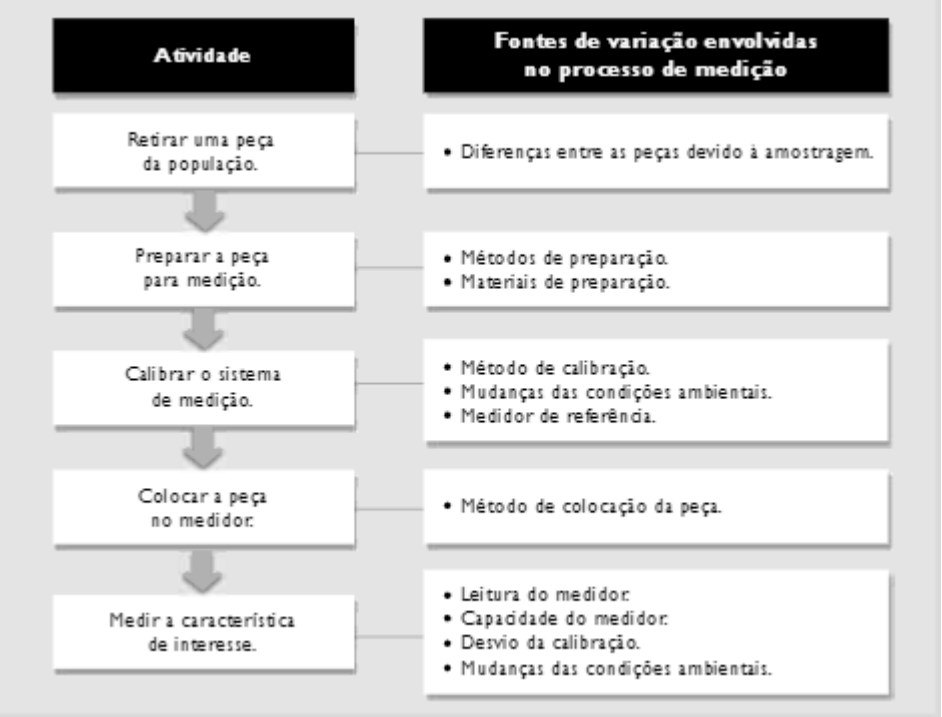
Fonte: Measurement System Analysis (2010)

2.6.2 Variação do Processo de Medição

A variação total de um processo é geralmente descrita como uma distribuição normal, sendo essa, premissa de todos os métodos aplicados na análise de um sistema de medição (DA FONSECA, 2008).

Durante um processo de medição, deve-se observar que, a obtenção das medições de uma variável consiste em um processo e que está submetida à inúmeras fontes de variação (WERKEMA, 2006). A figura 3 descreve um processo de medição de uma variável e as fontes de variação envolvidas no processo.

Figura 3 - Processo de Medição e Fontes de variação



Fonte: Werkema (2006)

De acordo com o Manual de Referência do MSA (2010), os tipos de variação podem ser descritos como:

1. Variação da Localização

Exatidão

Estabilidade

Tendência

Linearidade

2. Variação da Dispersão

Precisão

Repetitividade

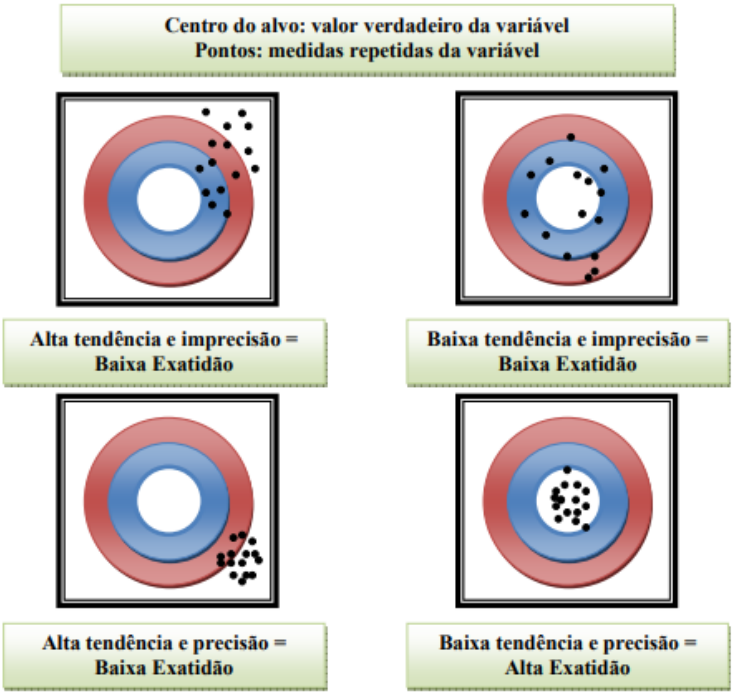
Reprodutibilidade

2.6.3 Variação da Localização

2.6.3.1 Exatidão

Exatidão é definida como a proximidade do valor real, ou de um valor aceitável de referência (MSA, 2010). A ISO e ASTM estabelecem que exatidão é a relação entre tendência e repetitividade. A figura 4 ilustra esta relação.

Figura 4 - Relação entre tendência e repetitividade

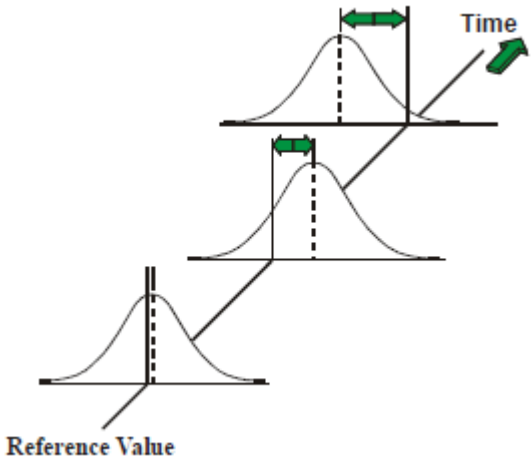


Fonte: Alves (2017)

2.6.3.2 Estabilidade

Estabilidade pode ser definida como Deslocamento Lento e Gradual, é a variação total das medições obtidas, quando medida uma característica única, em um período de tempo prolongado. Portanto, a estabilidade é a variação da tendência ao longo do tempo (MSA, 2010). A Figura 5 exemplifica a definição de estabilidade.

Figura 5 - Estabilidade



Fonte: MSA (2010)

Um processo é estável quando está estatisticamente controlado. A análise gráfica de cartas de controle permite determinar a estabilidade de um processo, indicando se existem ou não causas especiais a serem tratadas (ALVES, 2017). Segundo o manual do MSA (MEASUREMENT SYSTEMS ANALYSIS, 2010), algumas possíveis causas para a instabilidade de um processo são:

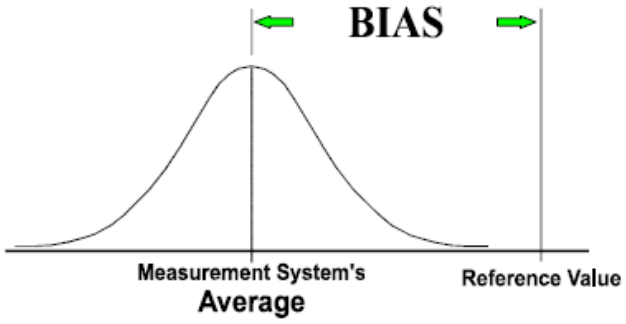
- Necessidade de calibração do instrumento;
- Instrumento com desgaste;
- Instrumento obsoleto ou envelhecido;
- Instrumento de baixa qualidade;
- Deformação/Distorção da peça;
- Mudança ambiental lenta e gradual - umidade, vibração;
- Aplicação - posição e tamanho da peça, habilidade do operador, erro de observação ou fadiga.

2.6.3.3 Tendência

Tendência é a diferença entre o valor real ou valor de referência e a média dos valores obtidos nas medidas da mesma característica, na mesma peça. De acordo

com o manual do MSA (MEASUREMENT SYSTEMS ANALYSIS, 2010), representa uma parcela do erro total composto pelos efeitos combinados de várias fontes de variação. As principais causas para tendência excessiva são as mesmas consideradas para um processo instável. A Figura 6 exemplifica a definição de tendência.

Figura 6 - Tendência (Bias)

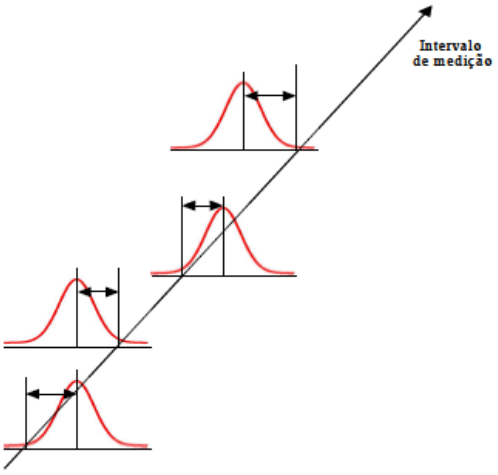


Fonte: MSA (2010)

2.6.3.4 Linearidade

A linearidade é definida como a variação da tendência em relação ao tamanho medido (MSA, 2010). O estudo de linearidade verifica a diferença da tendência em toda a faixa operacional do equipamento de medição. De acordo com CASTRO (2015), a linearidade é avaliada pela inclinação da reta de regressão e pela variação das partes medidas. Sendo assim, quanto menor a inclinação da reta, melhor a linearidade do dispositivo de medição, sendo válido o contrário. Suas causas são as mesmas da estabilidade e tendência. A Figura 7 ilustra a linearidade.

Figura 7 - Linearidade



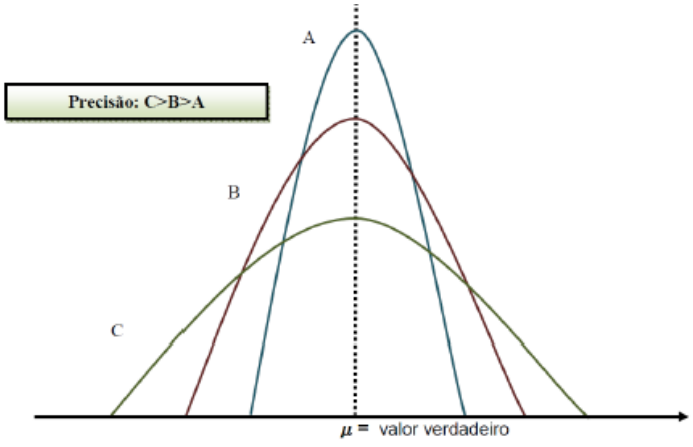
Fonte: FANIA (2017)

2.6.4 Variação da Dispersão

2.6.4.1 Precisão

De acordo com o MSA (2010), a precisão descreve o efeito líquido da discriminação, da sensibilidade e da repetibilidade através da faixa operacional do sistema de medição. É mais utilizada para descrever a variação esperada de repetidas medições feita em um intervalo de medição, que pode ser caracterizado em tamanho ou tempo. A Figura 8 ilustra a precisão.

Figura 8 - Precisão

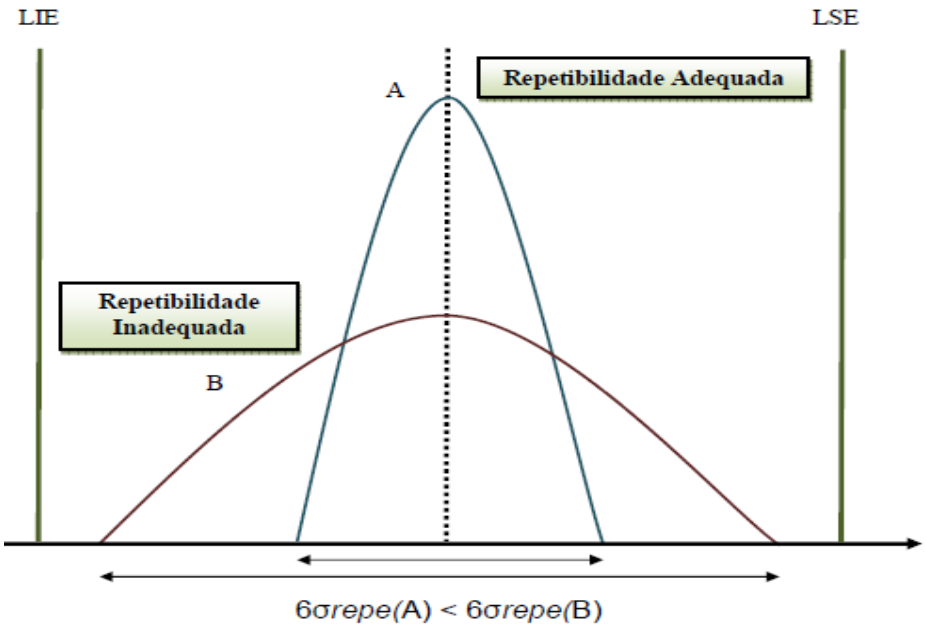


Fonte: Alves (2017)

2.6.4.2 Repetitividade

Repetitividade é a variação nas medidas realizadas com um único instrumento de medição, quando usado sucessivas vezes pelo mesmo operador, enquanto medindo uma característica sob condições definidas (MSA, 2010). As condições devem ser definidas e fixas e, são consideradas a peça, o instrumento, o padrão, o método, o operador e o ambiente (DA FONSECA, 2008). A Figura 9 exemplifica a repetitividade de dois sistemas de medição, A e B.

Figura 9 - Repetitividade



Fonte: Da Fonseca (2008)

No estudo de Repetitividade, o operador não deve saber que está medindo a mesma característica. Se a diferença entre as medições for pequena, o sistema apresenta boa repetitividade (RIBEIRO, CATEN, 2012).

Segundo o MSA (2010), as possíveis causas para uma repetitividade incerta, são:

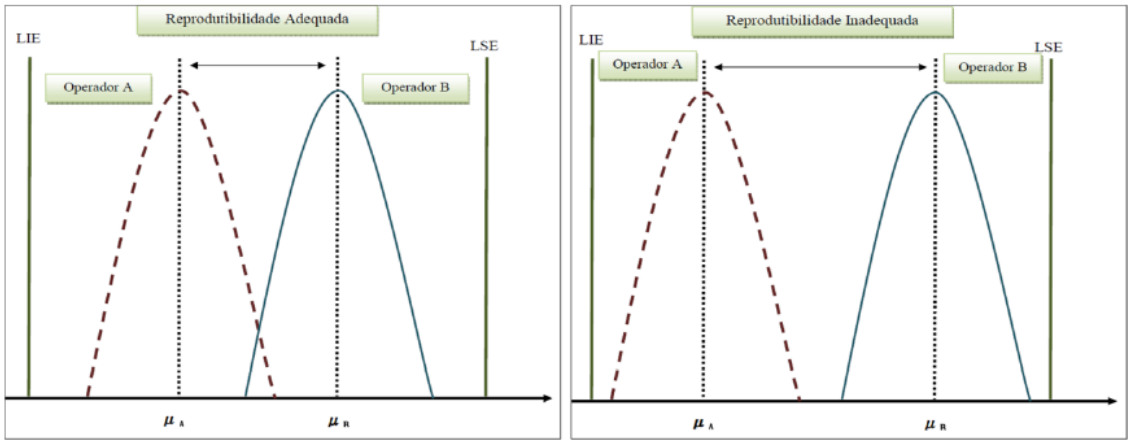
- Variação da amostra: posição, acabamento superficial, forma;
- Variação do instrumento: má qualidade, falta de manutenção, desgaste, falha do equipamento;
- Variação do padrão;

- Variação do método;
- Variação do avaliador: falta de experiência, técnica, habilidade;
- Variação do ambiente: iluminação, umidade, vibração;
- Falhas na aplicação.

2.6.4.3 Reprodutibilidade

Reprodutibilidade se refere a variação entre operadores. Pode ser definida como a variação das médias das medições feitas por diferentes operadores, quando operando com um mesmo instrumento de medição e medindo a mesma característica, sob as mesmas condições ambientais (MSA, 2010). Desta forma, a reprodutibilidade não é aplicada em sistemas automatizados, onde o operador não é a maior fonte de variação. Por isso, é conhecida como a variação das médias entre sistemas ou condições de medição (DA FONSECA, 2008). A Figura 10 exemplifica a reprodutibilidade entre dois operadores, A e B.

Figura 10 - Reprodutibilidade



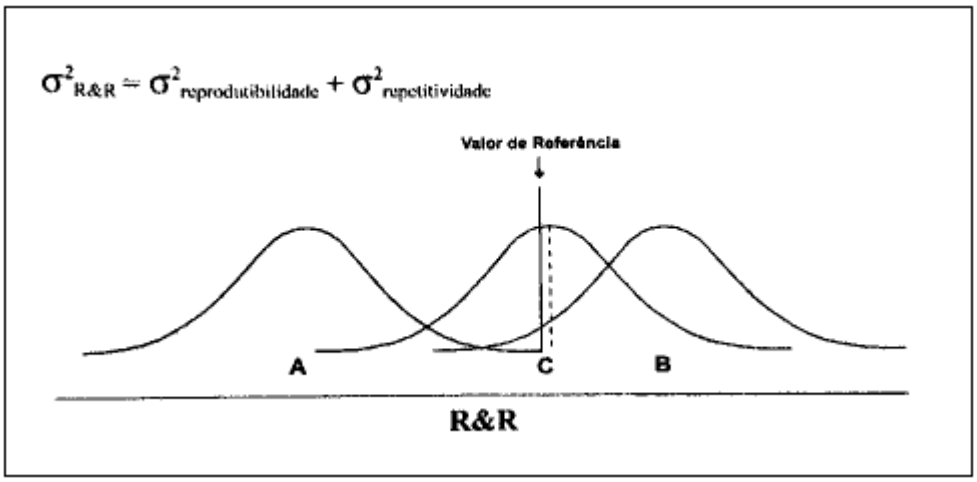
Fonte: Alves (2017)

Conforme o MSA (2010), as possíveis causas para uma reprodutibilidade incerta são as mesmas para a repetitividade, além da eficácia do treinamento do operador e projeto inadequado do instrumento.

2.6.4.4 Repetitividade e Reprodutibilidade (R&R)

O estudo de R&R de um sistema de medição pode ser definido como a variabilidade entre a repetitividade (equipamento) e a reprodutibilidade (operadores) (RIBEIRO, CATEN, 2012). Segundo o MSA (2010), são avaliadas a sensibilidade, a consistência e a uniformidade das medições de um sistema de medição, de forma a avaliar a variação nos resultados. A finalidade do estudo é determinar se a variabilidade do SM é menor que a variabilidade do processo ou produto analisado. A Figura 11 apresenta o estudo de R&R como a soma das variâncias dentro e entre sistemas de medição.

FIGURA 11 - R&R



Fonte: Castro (2015)

2.6.5 Critérios de Aceitação

O manual do MSA (2010) apresenta os critérios de aceitação para os estudos a serem realizados. Nos casos de erros de localização, não são aceitos pontos fora dos limites de controle, tendências crescentes ou decrescentes ou padrões anormais para a estabilidade. Os erros de tendência e linearidade não são aceitáveis se forem consideravelmente diferentes de zero ou que excedam o erro máximo determinado pelo processo de calibração do instrumento. Para os erros de dispersão, uma regra geral é utilizada para aceitação, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 - Critérios de Aceitação de erros de Dispersão (R&R)

Erro	Decisão
Abaixo de 10%	Geralmente considerado um sistema de medição aceitável.
Entre 10% e 30%	Pode ser considerado aceitável com base na importância de sua aplicação, custo do dispositivo de medição, etc. Deve ser aprovado pelo cliente.
Acima de 30%	Considerado não aceitável, sendo necessário um esforço para melhorar o sistema de medição.

Fonte: Adaptado de MSA (2010)

2.6.6 Número de Categorias Distintas

A fase final da análise de aceitação de um sistema de medição é a determinação do número de categorias distintas (ndc). O NDC representa a capacidade do sistema de medição de distinguir categorias de dados, dentro da variação do processo (ALVES, 2017). Uma regra definida pelo manual do MSA (2010) também é utilizada para o NDC:

- NDC = 1: Inaceitável para estimar os parâmetros do processo;
- NDC ≥ 2 e ≤ 4: Inaceitável para estimar os parâmetros do processo, mas pode ser usado para avaliação da conformidade do produto;
- NDC ≥ 5: Pode ser usado para estimar os parâmetros do processo e avaliar a conformidade do produto.

3 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido em uma indústria siderúrgica produtora de barras e perfis. A produção de barras inclui o produto barra chata de aço mola, que compõem feixes de molas para caminhões. No setor automotivo, algumas montadoras exigem certificações de qualidade específicas de seus fornecedores, como por exemplo, a certificação IATF 16949. Para tal, são demandados dos fornecedores, documentos e estudos que comprovem a capacidade de cumprimento das normas de qualidade durante o processo de produção.

Dentre estes documentos e estudos para a IATF 16949, estão o FMEA e o MSA.

O lócus da pesquisa foi o setor de inspeção de tarugos produzidos em um lingotamento contínuo de uma Aciaria Elétrica.

3.1 MÉTODO DE PESQUISA

Segundo Yin (2001), um estudo de caso pode ser visto como uma estratégia de pesquisa que compreende desde o planejamento à coleta de dados, ou seja, uma forma abrangente de pesquisa. Para realização deste trabalho, foi realizado um estudo de caso por se tratar de uma análise de um caso em seu contexto real, já que se buscou verificar a confiabilidade das medições realizadas na inspeção de tarugos com romboidade. Os dados foram coletados em planilhas, através dos registros do mapeamento do FMEA, das medições feitas pelos inspetores para os estudos do MSA e também pela observação da pesquisadora. Os resultados obtidos foram analisados e discutidos.

A pesquisa deste trabalho pode ser reproduzida com uso dos dados originais dispostos no Anexo A, seguindo as diretrizes dos manuais do FMEA, para mapeamento do processo e do MSA, para as análises estatísticas das medições.

Reunindo-se os objetivos específicos, utilizou-se a matriz de pesquisa da Tabela 2, proposta por Choguill (2005), para apresentar as ferramentas adotadas no estudo.

Tabela 2 – Matriz de pesquisa

	Objetivos Específicos	Método de Pesquisa	Ferramentas e metodologias utilizadas
1	Apresentar ferramentas de controle de qualidade	Levantamento bibliográfico, análise da literatura.	Apresentar ferramentas utilizadas no controle de qualidade de processos e produtos.
2	Apresentar ferramentas de análise de falhas	Levantamento bibliográfico, análise da literatura.	Apresentar ferramentas utilizadas na análise de falhas em processos e produtos.
3	Descrever as ferramentas FMEA e MSA	Levantamento bibliográfico, análise da literatura e manuais.	Descrever as core-tools FMEA e MSA.
4	Descrever o processo de produção de aço	Levantamento bibliográfico, análise da literatura.	Descrever o processo de fabricação de aço de forma geral e específica (Aciaria Elétrica).
5	Aplicar o FMEA e MSA em um processo de lingotamento contínuo de uma Aciaria elétrica	Aplicação de manuais, Análise de conteúdo.	FMEA MSA Análise estatística por software MINITAB

Fonte: Adaptado de CHOGUILL (2005)

3.2 APLICAÇÃO PRÁTICA DA PESQUISA

3.2.1 FMEA

Definição da equipe e escopo;

Aplicação da ferramenta FMEA no setor do lingotamento contínuo;

Proposição de ação de controle/correção das falhas identificadas.

3.2.2 MSA

Definição do equipamento e operadores envolvidos;

Estruturação e realização da coleta de dados;

Análise dos dados através de software estatístico Minitab;

Apresentação dos resultados dos estudos de Estabilidade, Tendência, Linearidade e R&R para a romboidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 FMEA

O conhecimento da ferramenta FMEA foi adquirido através de treinamentos e consultorias externas, e transmitido aos membros da equipe por meio de workshops e participação direta no processo de implantação do FMEA. Aqui, foi utilizado foi o FMEA de processo, por ser focado nas falhas de produção do resultado desejado. A primeira etapa na implantação do FMEA no setor estudado foi a definição de uma equipe multifuncional que desenvolveu o fluxograma do processo. A equipe estabelecida neste estudo abrangeu as áreas técnica e operacional, em papéis pré-estabelecidos, como descritos na Tabela 3, a fim de se assegurar que todo o processo fosse mapeado corretamente.

Tabela 3 - Equipe de projeto

Função na empresa	Papel no Projeto
Gerente da Aciaria	Definir os membros da Equipe, liderar a equipe envolvida, promover recursos para o desenvolvimento do trabalho.
Engenheira de Produto e Qualidade	Introduzir a metodologia, definir o escopo junto à Gerência, registrar o fluxograma do FMEA, definir prazos de ações.
Engenheira de Processo da Aciaria	Mapear o processo do Lingotamento Contínuo, realizar brainstorming com as equipes operacionais, apontar os riscos e propor ações corretivas.
Supervisor do Lingotamento Contínuo	
Técnico Administrativo	Implementar agenda, organizar reuniões, manter os registros de FMEA atualizados, dar follow-up das ações propostas.

Técnico de processo do Lingotamento Contínuo	Dedicar tempo ao processo contribuindo para o controle das etapas, auxiliar no brainstorming, na coleta de dados e no cumprimento dos prazos.
Inspetores de produção do Lingotamento Contínuo	Auxiliar no brainstorming, na coleta de dados e na identificação de possíveis causas dos problemas identificados.

Fonte: A autora (2020)

No lingotamento contínuo, a inspeção dos tarugos produzidos é realizada de forma a garantir que o material lingotado seja liberado para a laminação dentro dos parâmetros de qualidade exigidos. A inspeção ocorre, primeiramente, à quente, no leito de resfriamento, e, havendo suspeita ou confirmação de algum defeito ou anormalidade no tarugo, o material passa por inspeção à frio antes da disposição final.

De acordo com Kumar (1991), em fornos empurradores, a romboidade severa pode levar a problemas na movimentação dos tarugos no reaquecimento. Segundo Madias (2012), a romboidade pode estar acompanhada por trincas off-corner que podem se propagar até o centro do tarugo, gerando uma trinca diagonal completa. Diversos graus de romboidade e trincas off-corner podem ser vistos na Figura 12.

Figura 12 – Graus de romboidade e trincas off-corner em tarugos.

Fonte: MADIAS (2012)

O mapeamento do FMEA feito no lingotamento contínuo, indicou que o defeito de forma romboidade pode levar a problemas na laminação de tarugos que possuem

este defeito e, consequentemente, levar à defeitos no produto final. Uma vez que o formulário do FMEA apresenta informações detalhadas do processo produtivo da indústria estudada, optou-se por não apresentar todo o processo do lingotamento contínuo. Como exemplo, a Tabela 4 apresenta o desenvolvimento da falha identificada, a romboidade acima do padrão nos tarugos produzidos.

Tabela 4 - Tabela parcial do FMEA de processo do Lingotamento Contínuo

Lingotamento Contínuo de tarugos		ETAPA DO PROCESSO	
Solidificar o aço atendendo os requisitos de qualidade interna, superficial, dimensional e de forma		FUNÇÃO DO PROCESSO	
Tarugos com romboidade abaixo do especificado no padrão		REQUISITOS	
Presença do defeito de forma Romboidade nos tarugos acima do padrão		MODOS	FALHAS POTENCIAIS
Retrabalho / Sucateamento de tarugos; Defeitos superficiais (dobra ou trinca) na BCH Mola; Problemas no desbaste / Sucata acidental; Retrabalho / Sucateamento da BCH Mola.		EFEITOS	
7		SEVERIDADE	
Resfriamento secundário não uniforme	Resfriamento primário não uniforme	CAUSAS	
Utilização de secador; Limpeza programada e substituição periódica dos bicos spray; Alinhamento das bananas de refrigeração; Limpeza periódica dos filtros de água do sistema secundário PMP das bombas e válvulas.	Centralização da camisa d'água no molde; Inspeção do molde (presença de manchas); Controle de qualidade da água; Treinamento operacional na montagem do molde;	CONTROLE DE PREVENÇÃO	CONTROLES ATUAIS DO PROCESSO
6	7	OCORRÊNCIA	
Medição de romboidade por amostragem dos tarugos em 100% das corridas		CONTROLE DE DETECÇÃO	
6	6	DETECÇÃO	
Realizar revamp da Máquina de Lingotamento Contínuo para atender os requisitos de qualidade interna do aço.		AÇÕES RECOMENDADAS	RECOMENDAÇÕES
Gerente responsável pela Aciaria - CAPEX		RESPONSÁVEL E PRAZO	

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A aplicação do FMEA trouxe um melhor conhecimento do processo e suas falhas. O método gerou arquivos que servem como referência para o futuro, de maneira a garantir ações de melhoria contínua.

Na tabela 4, o modo de falha encontrado na etapa de Lingotamento Contínuo de tarugos, a presença da romboidade, obteve grau de severidade 7, significando um efeito de grande perda ou interrupção significante. A probabilidade de detecção da falha foi avaliada em 6, considerada baixa, uma vez que a romboidade é detectada através de medições realizadas pelos inspetores.

Verificou-se, conforme ilustrado na Tabela 4, que, para a falha identificada, apenas ações corretivas eram possíveis de serem realizadas sem a necessidade de grandes investimentos e, que, se realizadas de forma assertiva, conseguiriam minimizar o impacto gerado pela romboidade fora do padrão. Desta forma, como controle de detecção, cem por cento dos tarugos devem passar por inspeção, onde a romboidade é medida e classificada de acordo com procedimento interno da aciaria.

Como ação recomendada para garantir que a romboidade esteja dentro do padrão interno de qualidade, o revamp da máquina de lingotamento contínuo deve ser realizado e, como exige alto investimento via CAPEX, esta ação deve ser apresentada aos diretores industriais da usina em questão, para que seja avaliada e prazos sejam estipulados.

Como ação de controle da romboidade resultante do processo atual, foi solicitado o estudo de MSA para análise da confiabilidade das medições das inspeções realizadas no final na linha produtiva.

4.2 MSA

Conforme exposto anteriormente, o defeito romboidade pode ser detectado por meio de inspeção à quente e, quando há suspeita ou confirmação do mesmo, é realizada a inspeção à frio, através do uso de instrumentos de medição. As medições devem ser realizadas de modo a garantir a liberação ou sucateamento dos tarugos, conforme suas tolerâncias. Para realizar as medições da característica romboidade,

o instrumento utilizado foi um paquímetro analógico de bico longo, de capacidade 0-500mm (0,02mm), apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Paquímetro Analógico de Bico Longo 500mm 0,02mm.

Fonte: A autora (2020)

O estudo realizado seguiu as diretrizes do manual de MSA para os estudos de Estabilidade, Tendência, Linearidade e R&R. Os avaliadores escolhidos foram os inspetores que realizam as inspeções no setor do Lingotamento Contínuo, e foram identificados como A, B e C. As amostras foram numeradas de 1 a 10, de forma que não ficassem visíveis aos operadores.

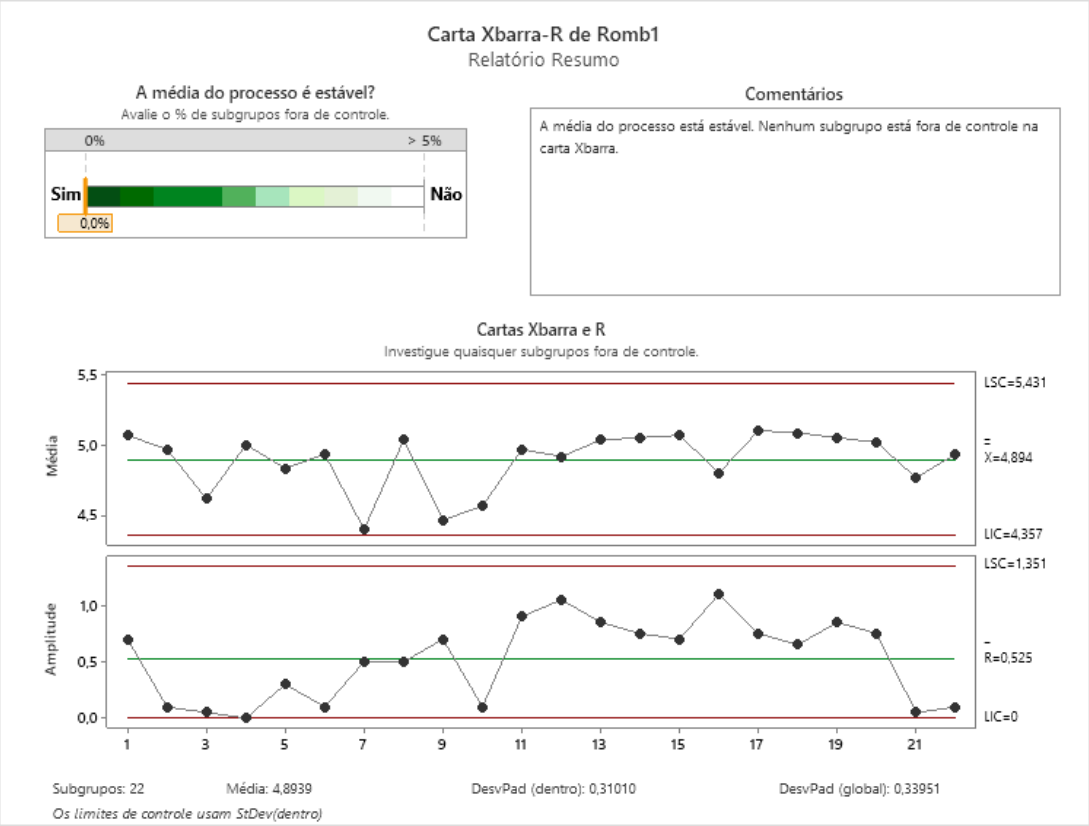
4.2.1 Estudo de Estabilidade

Para o estudo de estabilidade deve-se obter uma peça padrão, estabelecer seu valor de referência e realizar as medições periodicamente com o equipamento de medição do estudo. Os dados devem ser registrados em um formulário e plotados numa carta de controle Xbarra-R, usada para controle da variabilidade dentro dos subgrupos.

Uma amostra foi selecionada (Amostra 1 - Tarugo seção quadrada 130mm) e medida, em horários alternados, pelo avaliador A. Foram feitas três medições por dia, durante 11 dias. Os dados do estudo de estabilidade estão apresentados no Anexo A.

Os dados foram plotados em uma carta de controle Xbarra-R com o auxílio do software Minitab, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Carta de controle Xbarra-R para o Estudo de Estabilidade



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A carta de controle da Figura 14 apresenta apenas causas comuns, ou seja, os pontos coletados estão dentro dos limites da carta de controle e mostram que o processo é estável, indicando que o sistema de medição é estável. A carta de controle não apresenta pontos fora dos limites de controle, sete ou mais pontos consecutivos crescentes ou decrescentes ou sete ou mais pontos consecutivos acima ou abaixo da linha média, indicando, assim, que não existem causas especiais visíveis.

4.2.2 Estudo de Tendência e Linearidade

O estudo de tendência e linearidade ilustra como o erro se propaga ao longo da amplitude de medição do instrumento. Neste caso, foram selecionadas cinco peças que cobriam a amplitude de trabalho:

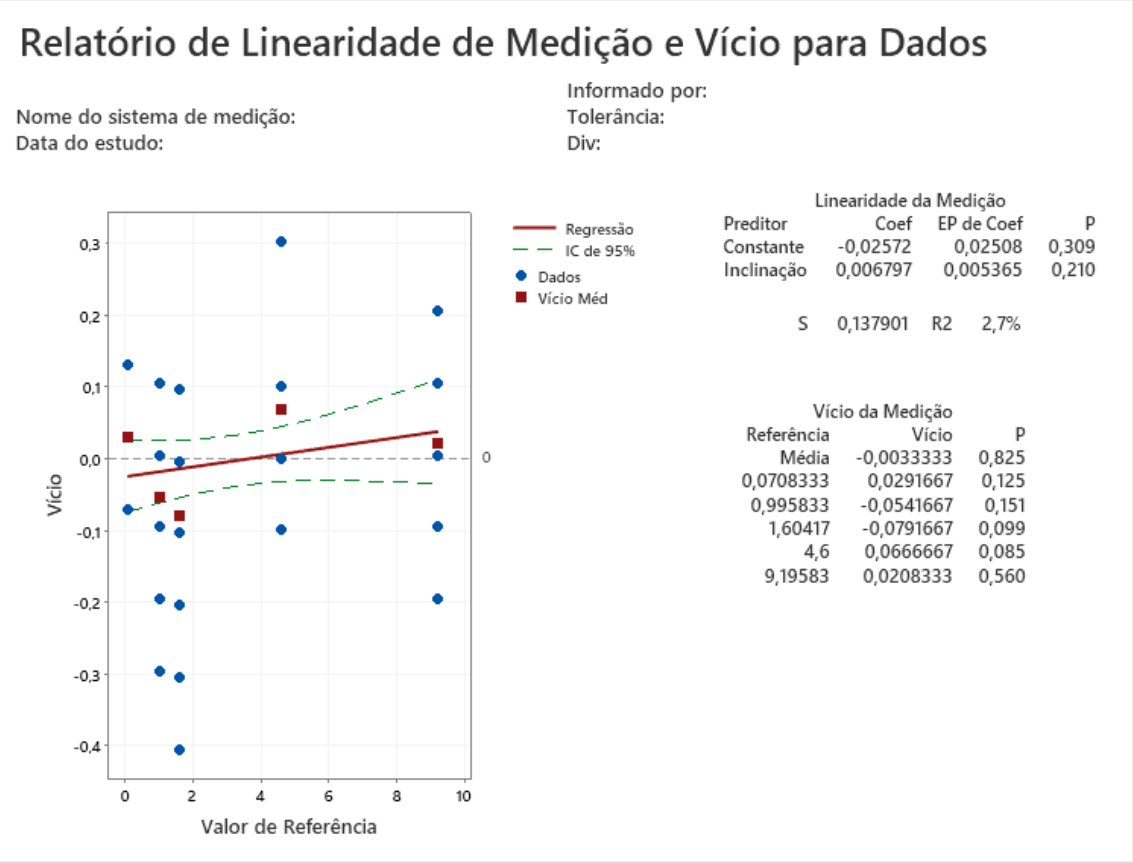
1. Amostra 1 - Tarugo seção quadrada 130mm - tolerância romboidade 9mm;
2. Amostra 2 - Tarugo seção quadrada 130mm - tolerância romboidade 9mm;

3. Amostra 3 - Tarugo seção quadrada 130mm - tolerância romboidade 9mm;
4. Amostra 4 - Tarugo seção quadrada 160mm - tolerância romboidade 11mm;
5. Amostra 5 - Tarugo seção quadrada 100mm - tolerância romboidade 7mm.

Determinaram-se seus valores de referência e cada peça foi medida doze vezes por um inspetor do lingotamento, de forma aleatória. Os dados coletados se encontram no Anexo A.

A avaliação da tendência e linearidade do sistema de medição foi feita por meio de análise gráfica, plotando os dados de referência e os valores medidos no software Minitab. A Figura 15 ilustra a tendência e linearidade do sistema de medição estudado.

Figura 15 – Análise da Linearidade



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Na Figura 15, os limites de confiança ao nível de 95% estão representados pela linha tracejada verde, a reta de regressão é definida pela linha vermelha, as

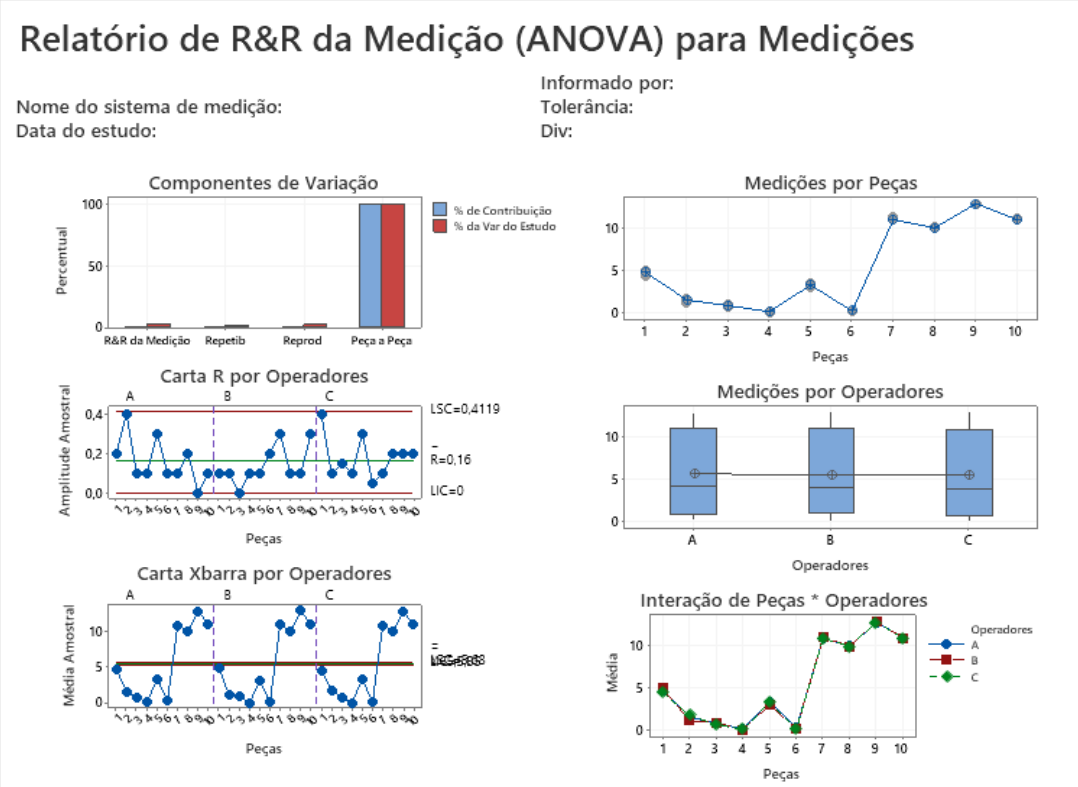
medições efetuadas são os pontos em azul e, os pontos em vermelho são a média em cada intervalo. Quanto menor a inclinação da reta, menor é a linearidade do sistema de medição, ou seja, o erro se mantém ou é propagado de forma linear. Neste caso, a reta representada possui pouca inclinação, indicando que o vício médio é relativamente constante. A inclinação presente mostra que, à medida que o valor da romboidade aumenta, o erro tende a ser maior. Já o espalhamento do erro das leituras não está diretamente associado ao tamanho das peças, isto é, não cresce com o aumento da romboidade ou decresce com a redução da romboidade. O valor de p para a inclinação é de 0,210 ($p>0,05$) e é possível concluir que a linearidade não é estatisticamente significativa e, como o zero está contido dentro dos limites de confiança, a tendência também não é estatisticamente significativa.

4.2.3 Estudo de R&R

Para o estudo de R&R, foram escolhidas dez amostras que representam a amplitude do processo e três inspetores para realização das medições. As amostras foram numeras de 01 a 10, de forma que os inspetores não pudessem diferenciar entre elas. Os operadores, identificados como A, B e C, realizaram as medições de todas as peças, de forma aleatória, por três vezes. Os dados coletados se encontram no Anexo A.

Os resultados obtidos se encontraram nas Figuras 16 e 17, que representam respectivamente, o relatório gráfico e os valores numéricos do estudo de R&R.

Figura 16 - Relatório gráfico de estudo de R&R



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Figura 17 - Valores numéricos do estudo de R&R

R&R da Medição

Componentes de Variância

Fonte	CompVar	%Contribuição (de CompVar)
Total de R&R da Medição	0,0301	0,12
Repetibilidade	0,0103	0,04
Reprodutibilidade	0,0198	0,08
Operadores	0,0000	0,00
Operadores*Peças	0,0198	0,08
Peça a Peça	26,0051	99,88
Variação Total	26,0352	100,00

Avaliação das Medições

Fonte	DesvPad (DP)	Var do Estudo (6 × DP)	%Var do Estudo (%VE)
Total de R&R da Medição	0,17351	1,0411	3,40
Repetibilidade	0,10138	0,6083	1,99
Reprodutibilidade	0,14082	0,8449	2,76
Operadores	0,00000	0,0000	0,00
Operadores*Peças	0,14082	0,8449	2,76
Peça a Peça	5,09952	30,5971	99,94
Variação Total	5,10247	30,6148	100,00

Número de Categorias Distintas = 41

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

No gráfico Componentes de Variação, ilustrado na Figura 16, os componentes são individualizados. A barra azul representa a contribuição o percentual de contribuição para a variação geral e as vermelhas, a contribuição para a variação no estudo. Neste estudo, há pouca variação na repetitividade, reprodutibilidade e R&R, sendo a maior parte da variação está em Peça a Peça, o que significa que, se todas as medidas feitas pelos inspetores fossem feitas sem variação, a única variação seria a diferença de romboidade entre as peças. Avaliando os componentes numéricos na Figura 17, vemos que a variação do R&R total equivale à 3,40%, sendo 1,99% da repetitividade e 2,76% da reprodutibilidade, enquanto variação por Peça a Peça apresenta 99,94% de contribuição. Desta forma e, a partir do número de categorias distintas encontras, 41, podemos concluir que a análise do sistema de medição é válida.

O gráfico Carta R por Operadores, apresentado na Figura 16, representa a amplitude da amostra por operador, onde é possível analisar a consistência das medições. Neste caso, nenhum inspetor excedeu os limites de controle ou apresentou padrões comportamentais muito diferentes, indicando uma boa consistência entre os inspetores.

Ainda na Figura 16, o gráfico Carta Xbarra por Operadores retrata a média das medidas para cada operador. Espera-se que a maioria dos pontos fique fora dos limites de controle, o que pode ser verificado neste caso, que mostra maior variação das amostras que da variação da medição.

No gráfico Medições por peças as medições encontram-se bastante próximas, indicando que as medições não apresentam grande variabilidade entre as peças.

No gráfico Medições por operador as medições encontram-se em boxplots, comparando os três inspetores. Não existem diferenças significantes entre os inspetores indicando que não existe grande variabilidade entre os mesmos.

O gráfico Interações de peças * Operadores não apresenta divergências significantes, indicando que os inspetores medem de forma semelhante, não existindo dificuldade com algum tipo de peça.

5 CONCLUSÕES

Por meio da análise realizada com a aplicação do FMEA de processo foi possível concluir que a romboidade, um defeito de forma que pode ocorrer durante o lingotamento contínuo de tarugos devido a problemas na transferência de calor durante o resfriamento, pode causar sucateamento do tarugo e do produto laminado, defeitos superficiais no produto laminado e retrabalho de material, o que gera perdas de processo. Sendo assim, foi proposta ação de revamp da máquina de lingotamento para máxima correção do defeito e acompanhamento da situação atual por meio de estudos de MSA.

O Estudo de Estabilidade apresenta apenas causas comuns e mostram que o processo é estável.

Na Análise da Linearidade é possível concluir que a linearidade não é estatisticamente significativa e a tendência também não é estatisticamente significativa.

O Estudo de R&R mostrou que é possível verificar a consistência das medições dos operadores, o que indica que não existe grande variabilidade entre os mesmos. Neste estudo, há pouca variação na repetitividade, reprodutibilidade e R&R, sendo a maior parte da variação em Peça a Peça, atestando que, se todas as medidas feitas pelos inspetores fossem feitas sem variação, a única variação seria a diferença de romboidade entre as peças.

A análise das fontes de variação indica que a capacitação técnica dos inspetores de tarugos contribui para o resultado final do estudo e foi verificada a confiabilidade das medições realizadas. Apesar de não terem sido detectadas causas que não são naturais ao processo de medição, como erros operacionais, foi estabelecido um cronograma anual de treinamento de metrologia, para assegurar a eficiência do processo.

O trabalho propõe o uso das ferramentas FMEA (Análise dos Modos de Falha e seus efeitos) e MSA (Análise dos sistemas de medição) a fim de avaliar a confiabilidade das medições de romboidade em tarugos produzidos pelo lingotamento contínuo de uma Aciaria Elétrica.

Ao analisar todas as informações do estudo de FMEA e MSA conclui-se que as Core-Tools são grandes ferramentas de qualidade. Como foi possível verificar, estas ferramentas também auxiliam no direcionamento de investimentos na implantação

de processos mais precisos e confiáveis. Desta forma, o FMEA foi padronizado na usina estudada, de forma a estimular a melhoria contínua nos processos.

6 REFERÊNCIAS

ABNT. **O que significa a ABNT NBR ISO 9001**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/pdf/cb25docorient.pdf>. Acesso em: 13 jun.2020

AIAG. **Automotive Core Tools**. Disponível em: <https://www.aiag.org/quality/automotive-core-tools>. Acesso em: 13 jun.2020.

ALVES, F. R. R; LUZ, M. P da. **Análise dos Sistemas de Medição de uma empresa de trefilação de tubos de aço**. ENEGEP, 2017.

ARAÚJO, Luiz Antonio de. **MANUAL DE SIDERURGIA: Produção**. 1. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 1997.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-5462: Confiabilidade e mantenabilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

BRAVI, L; MURMURA, F.; SANTOS, G. **The ISO 9001:2015 Quality Management System Standard: Companies' Drivers, Benefits and Barriers to Its Implementation**. 2019.

CARVALHO, Marly Monteiro de; Paladini, Edson P. **Gestão da Qualidade Teoria e Casos**. 2. ed. Elsevier, 2012.

CASTRO, R. F. **MEASUREMENT SYSTEM ANALYSIS (MSA) COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO EM UMA INDUSTRIA SIDERÚRGICA**. 2015. 74 p. Monografia (graduação) - Universidade São Francisco. 2015.

COTA, K. A.; FREITAS, M. A. M. D. **Gestão da Qualidade, um desafio permanente: um estudo de caso sobre o processo de manutenção de um sistema de qualidade em uma indústria metalúrgica, Produto & Produção**, [S.l] v. 14, n. 2, 2013.

DA FONSECA, MARIANA PAES. **A Análise do Sistema de Medição (MSA) como ferramenta no controle dos processos em uma indústria de dispositivos médicos descartáveis**. 2008. 70 p. Monografia (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Engenharia de Produção. 2008.

DALOSTO, Diogo Nunes**. Uma abordagem para FMEA baseada em métodos quantitativos**. 2018. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

FANIA. CORETOOLS, **Ferramentas da Qualidade**. Disponível em: <http://www.fania.com.br/downloads/coretools.pdf>. Acesso em 05 set.2020.

FAESARELLA, I.S.; SACOMANO, J.B.; CARPINETTI, L.C.R.; **Gestão da Qualidade: Conceitos e Ferramentas**. USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Produção, 2006.

FORD Motor Company. **Failure Mode and Effects Analysis FMEA Handbook (with Robustness Linkages)**. Version 4.2, DEARBORN, 2011.

IATF. **International Automotive Task Force**. Disponível em: <https://www.iatfglobaloversight.org/>. Acesso em: 13 jun.2020.

KUMAR, S. **Mould thermal response and formation of defects in the continuous casting of steel billets**. 1996. 310 f. Tese. Departament of Metals and MaterialsEngineering, University of British Columbia, Vancouver, 1996.

LAURENTI, Rafael. **Sistematização de problemas e práticas da análise de falhas potenciais no processo de desenvolvimento de produtos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Processos e Gestão de Operações) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

LOBO, Renato Nogueirol. **Gestão da Qualidade**. São Paulo: Érica, 2020.

MADIAS, Jorge. **Uma revisão do problema de romboidade no lingotamento contínuo de tarugos**. 2012.

MELO, Thuany Fátima. **Adequação das ferramentas essenciais para a qualidade automotiva na IATF 16949 e nos requisitos específicos das montadoras**. 2017. 90 p. TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina. Engenharia Automotiva. Campus Joinville. 2017.

MSA, **MEASUREMENT SYSTEMS ANALYSIS**, 4 ed. 2010.

NEW STILL CONSTRUCTION. **An introduction to steelmaking**. Disponível em: <https://www.newsteelconstruction.com/wp/an-introduction-to-steelmaking/>. Acesso em: 11 jun.2020.

OAKLAND, John S. **Gerenciamento da Qualidade Total (TQM)**. São Paulo: Nobel, 1994.

PEREIRA, M.R. et al. **Aplicação de métodos de análise de falhas no tratamento de não conformidades no setor de óleo e gás**. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 11. Curitiba, 2019.

QUARESMA, R.G; SANTOS, D. V dos; SILVEIRA, M. L. **Análise do Sistema de medição: Aplicação do método MSA em uma empresa do setor automobilístico**. 2018.

RIBEIRO, J. L. D; CATEN, C. S. T. **Série Monográfica Qualidade, Controle Estatístico do Processo**. 2012. 172 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2012.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006a.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos de lingotamento dos aços**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006b.

Rosa Filho, D. J. **Análise de porosidade interna “blowholes” em tarugos de aço baixo carbono**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2013.

Sant`Anna, A. P; Junior, R. P. da S. P. **Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA**. Sistemas & Gestão, v. 5, n.3, p. 179-191, 2010. https://doi.org/10.7177/sg.2010.V5N3A5

SANTOS, E. J. **Aplicação e implicações da especificação técnica ISO/TS 16949 na cadeia automotiva**. 2006. 78 p. Dissertação (Mestrado profissional em Engenharia Mecânica), Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

WATSON, P. F; PETRIE, A. **Method agreement analysis: a review of correct methodology**. Theriogenology, v.73, n. 9, p.1167-79, jun. 2010.

Werkema, M. C. C. **Avaliação de Sistemas de Medição. Seis Sigma**. 1. ed. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2006.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ANEXOS

Dados Estudo de Estabilidade

Amostra	Romboidade	Medida	Amostra	Romboidade	Medida
1	5,4	1	12	5,55	1
	5,1	2		4,7	2
	4,7	3		4,5	3
2	5	1	13	5,55	1
	4,9	2		4,85	2
	5	3		4,7	3
3	4,6	1	14	5,5	1
	4,6	2		4,75	2
	4,65	3		4,9	3
4	5	1	15	5,45	1
	5	2		4,75	2
	5	3		5	3
5	5	1	16	5,4	1
	4,7	2		4,7	2
	4,8	3		4,3	3
6	5	1	17	5,55	1
	4,9	2		4,95	2
	4,9	3		4,8	3
7	4,1	1	18	5,45	1
	4,6	2		4,8	2
	4,5	3		5	3
8	5	1	19	5,55	1
	5,3	2		4,9	2
	4,8	3		4,7	3
9	4,9	1	20	5,45	1
	4,2	2		4,9	2
	4,3	3		4,7	3
10	4,6	1	21	4,75	1
	4,5	2		4,75	2
	4,6	3		4,8	3
11	5,5	1	22	4,9	1
	4,8	2		4,9	2
	4,6	3		5	3

Dados Estudo de Tendência e Linearidade

Peça	Referência Romboidade	Medições Romboidade	Peça	Referência Romboidade	Medições Romboidade
1	4,60	4,60	7	9,20	9,20
1	4,60	4,70	7	9,20	9,10
1	4,60	4,90	7	9,20	9,10
1	4,60	4,70	7	9,20	9,10
1	4,60	4,60	7	9,20	9,40
1	4,60	4,70	7	9,20	9,20
1	4,60	4,70	7	9,20	9,00
1	4,60	4,90	7	9,20	9,20
1	4,60	4,50	7	9,20	9,30
1	4,60	4,60	7	9,20	9,40
1	4,60	4,60	7	9,20	9,20
1	4,60	4,50	7	9,20	9,40
2	1,60	1,70	9	0,07	0,10
2	1,60	1,70	9	0,07	0,10
2	1,60	1,60	9	0,07	0,00
2	1,60	1,50	9	0,07	0,00
2	1,60	1,20	9	0,07	0,10
2	1,60	1,40	9	0,07	0,20
2	1,60	1,60	9	0,07	0,20
2	1,60	1,30	9	0,07	0,20
2	1,60	1,50	9	0,07	0,20
2	1,60	1,40	9	0,07	0,10
2	1,60	1,70	9	0,07	0,00
2	1,60	1,70	9	0,07	0,00
3	1,00	1,10			
3	1,00	1,00			
3	1,00	0,90			
3	1,00	1,00			
3	1,00	1,00			
3	1,00	0,90			
3	1,00	1,00			
3	1,00	1,00			
3	1,00	0,80			
3	1,00	0,70			
3	1,00	0,80			
3	1,00	1,10			

Dados Estudo de R&R cruzado

OrdemEns	Peças	Operadores	Medições	OrdemEns	Peças	Operadores	Medições
1	1	A	4,7	46	6	B	0,1
2	2	A	1,7	47	7	B	11
3	3	A	0,9	48	8	B	9,9
4	4	A	0,2	49	9	B	12,9
5	5	A	3,5	50	10	B	11,1
6	6	A	0,2	51	1	C	4,45
7	7	A	10,9	52	2	C	1,7
8	8	A	9,9	53	3	C	0,65
9	9	A	12,8	54	4	C	0
10	10	A	10,9	55	5	C	3,15
11	1	B	4,9	56	6	C	0,1
12	2	B	1,1	57	7	C	10,9
13	3	B	0,9	58	8	C	10
14	4	B	0	59	9	C	12,7
15	5	B	3,1	60	10	C	10,9
16	6	B	0,2	61	1	A	4,9
17	7	B	10,9	62	2	A	1,3
18	8	B	10	63	3	A	0,8
19	9	B	12,8	64	4	A	0,2
20	10	B	10,9	65	5	A	3,4
21	1	C	4,3	66	6	A	0,3
22	2	C	1,8	67	7	A	10,9
23	3	C	0,8	68	8	A	10,1
24	4	C	0,05	69	9	A	12,8
25	5	C	3,45	70	10	A	10,9
26	6	C	0,1	71	1	B	5
27	7	C	10,9	72	2	B	1,1
28	8	C	10,1	73	3	B	0,9
29	9	C	12,9	74	4	B	0
30	10	C	11	75	5	B	3
31	1	A	4,7	76	6	B	0
32	2	A	1,7	77	7	B	11,2
33	3	A	0,8	78	8	B	9,9
34	4	A	0,1	79	9	B	12,9
35	5	A	3,2	80	10	B	10,8
36	6	A	0,3	81	1	C	4,7
37	7	A	10,8	82	2	C	1,7
38	8	A	9,9	83	3	C	0,65
39	9	A	12,8	84	4	C	0,1
40	10	A	11	85	5	C	3,25
41	1	B	5	86	6	C	0,15
42	2	B	1,2	87	7	C	10,8

43	3	B	0,9	88	8	C	9,9
44	4	B	0,1	89	9	C	12,8
45	5	B	3	90	10	C	10,8