

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Paulo Cesar de Castilho

**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA WCM (WORLD CLASS
MANUFACTURING) PARA REDUÇÃO DO ÍNDICE DE
REFUGO EM PEÇAS PRODUZIDAS PELO PROCESSO DE
METALURGIA DO PÓ**

TAUBATÉ – SP

2022

PAULO CESAR DE CASTILHO

**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA WCM (WORLD CLASS
MANUFACTURING) PARA REDUÇÃO DO ÍNDICE DE
REFUGO EM PEÇAS PRODUZIDAS PELO PROCESSO DE
METALURGIA DO PÓ**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre
pelo curso de Mestrado Profissional do Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté
Área de Concentração: Gestão da Produção
Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

TAUBATÉ – SP

2022

Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi
Universidade de Taubaté - Unitau

C352u Castilho, Paulo Cesar de
Utilização da técnica WCM (World Class Manufacturing) para redução do índice de refugo em peças produzidas pelo processo de metalurgia do pó / Paulo Cesar de Castilho. -- 2022.
96 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, Taubaté, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Manufatura de classe mundial. 2. Ferramentas da qualidade. 3. Causa raiz. 4. Ação corretiva. 5. Experimentos. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. Mestrado em Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD – 658.5

PAULO CESAR DE CASTILHO

**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA WCM (WORLD CLASS MANUFACTURING) PARA
REDUÇÃO DO ÍNDICE DE REFUGO EM PEÇAS PRODUZIDAS PELO
PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo Curso de Pós-
graduação em Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.
Área de concentração: Gestão da Produção

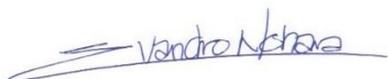
Data: 05 de Março de 2022

Resultado: APROVADO

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. EVANDRO LUÍS NOHARA
Departamento de Engenharia Mecânica
Presidente da banca – Orientador

Universidade de Taubaté



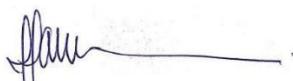
Prof. Dr. MACIR BERNARDO DE OLIVEIRA
Membro Externo

Universidade Anhembi Morumbi



Profª. Dra. MIROSLAVA HAMZAGIC
Membro interno

Universidade de Taubaté



AGRADECIMENTOS

A Deus, por prover de forma abundante a energia necessária para conclusão de todos os projetos que nos propomos a fazer, e a todas as pessoas que participaram da minha vida ajudando a encontrar esta energia.

A minha esposa Débora pela compreensão atrasando programas de lazer devido a dedicação a este trabalho e pelo apoio incondicional a conclusão deste, e de todos os projetos da minha carreira.

Aos meus filhos Vinicius, Ana Laura e Beatriz que sempre me incentivaram a seguir com este projeto me passando a energia necessária.

Ao meu orientador, Professor Doutor Evandro Luís Nohara que proporcionou em uma situação diferente de relacionamento por reuniões a distância, todo o apoio e incentivo para a conclusão deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Sorte é o nome que o vagabundo dá ao esforço que ele não fez.”

Leandro Karnal

“(…) vossos olhos se abrirão, e sereis como deuses conhecedores do bem e do mal.”

Gênesis 3.4

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família a princípio formada por minha esposa Débora e meus filhos Vinicius, Ana Laura e Beatriz, porém, em um conceito mais amplo de família, meus pais, irmãos e todas as pessoas que contribuíram para eu chegar onde estou.

RESUMO

O presente trabalho, tem como objetivo geral a utilização da técnica WCM (*World Class Manufacturing*) no pilar QCS (*Quality and Customer Safety*), como ferramenta para redução de custos de não qualidade em projetos de redução de refugo no processo de metalurgia do pó, ligado a fabricação do componente guia da haste de amortecedores automotivos, executado em uma indústria do ramo automobilístico. Utilizou-se as ferramentas da qualidade sete passos para solução de problema, matriz QA, 5G, 5We1H, diagrama 4M, 5Whys e delineamento de experimentos (DOE). Partindo-se da caracterização do produto e priorização do defeito a ser estudado, buscou-se conhecer o fenômeno envolvido com o defeito, estudo da causa raiz, tomada de ações corretivas eficazes e o conhecimento do principal parâmetro do processo de modo a atingir zero defeitos. Com a devida análise dos resultados positivos do projeto, definiu-se uma padronização de acordo aos requisitos da técnica utilizando-se o Procedimento Operacional Padrão (SOP - *Standard Operating Procedure*) e as cinco questões para zero defeito de modo a se garantir um processo robusto com a perpetuação de zero defeitos. Os resultados obtidos demonstram que foi atingida a condição de zero defeitos na guia da haste de amortecedores automotivos, o que adicionalmente repercutiu internamente na motivação dos colaboradores, nas relações com clientes e nos resultados financeiros da empresa.

Palavras-chave: Manufatura de classe mundial, Ferramentas da qualidade, Causa raiz, Ação corretiva, Experimentos.

ABSTRACT

The general objective of the present work is the use of WCM (World Class Manufacturing) technique in QCS (Quality and Customer Safety) pillar, as a tool to reduce non-quality costs in reducing scrap projects working in powder metallurgy process, linked to manufacture of the rod guide which is a component of an automotive shock absorbers, performed in an automotive industry.. Quality tools were used seven steps to problem solving, QA matrix, 5G, 5We1H, 4M diagram, 5Whys and design of experiments (DOE). Starting from the characterization of the product and prioritization of the defect to be studied, it was sought, to know the phenomenon involved with the defect, the root cause study, take effective corrective actions and the knowledge of the process main parameter in order to reach zero defects. With the due analysis of the project positive results, a standardization was defined according to the requirements of the methodology using the Standard Operating Procedure (SOP) and the five questions for zero defects in order to guarantee a robust process with the zero defects perpetuation. The results obtained demonstrate that the condition of zero defects in the guide of the rod of automotive shock absorbers was reached, which additionally had internal repercussions on the motivation of the employees, customer relations and the company's financial results.

Keywords: World Class Manufacturing, Quality tools, Root cause, Corrective action, Experiments.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Pilares Técnicos do WCM.....	22
Fig. 2 – Pilares Gerenciais do WCM.....	24
Fig. 3 – Sete passos para solução de problemas.....	30
Fig. 4 – Diagrama 4 M.....	35
Fig. 5 – Lição de um ponto (OPL – <i>One Point Lesson</i>)	38
Fig. 6 – Procedimento operacional padrão (SOP – <i>Standard Operating Procedure</i>)	38
Fig. 7 – Informação para Prevenção de Problemas (MP-Info)	39
Fig. 8 – Abordagem do problema como um sistema.....	42
Fig. 9 – Fatores que influenciam o sistema.....	42
Fig.10 – Experimento com um fator.....	44
Fig.11 – Experimento com dois fatores.....	44
Fig.12 – Experimento com dois fatores – Representação gráfica.....	45
Fig.13 – Interação entre fatores.....	46
Fig.14 – Experimento com fatorial <i>design</i> de 2^3	47
Fig.15 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos.....	47
Fig. 16 – Comparação entre processos.....	48
Fig. 17 – Aplicação da Metalurgia do pó em Automóveis	49
Fig. 18 – Fluxo de processo.....	52
Fig. 19 – Fluxograma de fabricação de pó de ferro. Processo atomização por água.....	54
Fig. 20 – Representação esquemática do processo de atomização em água.....	55
Fig. 21 – Representação esquemática do processo de atomização a gás.....	55
Fig. 22 – Morfologia de Pós.....	56
Fig. 23 – Componentes do ferramental.....	58
Fig. 24 – Sistema de Alimentação.....	58
Fig. 25 – Enchimento por gravidade.....	59
Fig. 26 – Sequência de movimentos na compactação de dupla ação.....	60
Fig. 27 –Montagem dos componentes do ferramental e seus movimentos.....	60
Fig. 28 – Remoção Executada pela Sapata.....	61
Fig. 29 – Ilustração de sinterização.....	62
Fig. 30 – Guia da haste e sua montagem em Amortecedor.....	65

Fig. 31 – Esquema de montagem para medição de densidade.....	66
Fig. 32 – Matéria Prima.....	66
Fig. 33– Prensa e Forno.....	67
Fig. 34 – Ferramental Utilizado.....	67
Fig. 35 – Fluxograma do Processo.....	68
Fig. 36 – Problema e fenômeno estudado.....	75
Fig. 37 – Aplicação do diagrama 4M.....	78
Fig. 38 – Distribuição do pó com punção único.....	79
Fig. 39 – Risco de esforços acima do aceitável – descarga.....	80
Fig. 40 – Risco de esforços acima do aceitável – transporte.....	81
Fig. 41 – Risco de esforços acima do aceitável – forno.....	81
Fig. 42 – Modificação do punção superior.....	83
Fig. 43 – Transporte por esteira.....	84
Fig. 44 – Resumo dos resultados.....	85
Fig. 45 – Resultados DOE – Fator mais significativo.....	87
Fig. 46 – Resultados DOE – Interação entre fatores.....	88
Fig. 49 – Resumo dos resultados após DOE.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz QA (<i>Quality Assurance</i>)	32
Tabela 2 - Cinco Questões para Zero Defeito.....	40
Tabela 3 - Desenvolvimento Histórico da Metalurgia do pó.....	51
Tabela 4 - Sequência das Atividades.....	64
Tabela 5 - Matriz QA contemplando defeito estudado.....	72
Tabela 6 - Propriedades – Dados coletados durante 5G.....	73
Tabela 7 - Utilização da técnica 5W1H.....	74
Tabela 8 - Cronograma do projeto.....	76
Tabela 9 - Aplicação da técnica dos 5 Whys.....	79
Tabela 10 – DOE – Definição de variáveis e níveis.....	86
Tabela 11 – DOE – Resultados dos testes.....	87
Tabela 12 – Avaliação das propriedades após ações.....	90
Tabela 13 – Cinco questões para zero defeito (aplicação).....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Princípios, Ferramentas e Passos do WCM.....	26
Quadro 2 – Ferramenta 5G	33
Quadro 3 – Ferramenta 5W1H	34
Quadro 4 – Guia para 4M.....	36
Quadro 5 – Equipamentos de Medição	68

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIACÖES

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	(Organização internacional para Padronização)
IATF	<i>International Automotive Task Force</i>	(Força Tarefa Automotiva Internacional)
Ppm	<i>Parts per million</i>	(Peças por milhão)
WCM	<i>World Class Manufacturing</i>	(Fabricação de Classe Mundial)
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>	(Manutenção Produtiva Total)
TQC	<i>Total Quality Control</i>	(Controle de Qualidade Total)
JIT	<i>Just in Time</i>	(Na Hora Certa)
QCS	<i>Quality and Customer Safety</i>	(Qualidade e Segurança do Cliente)
QA	<i>Quality Assurance</i>	(Garantia da Qualidade)
PD	<i>People Development</i>	(Desenvolvimento de Pessoas)
KPIs	<i>Key Performance Indicator</i>	(Indicadores Chave de Desempenho)
TWTTP	<i>The Way to Teach People</i>	(A Maneira de Treinar Pessoas)
CP	<i>Process Capability</i>	(Capabilidade do Processo)
CPK	<i>Process Capability</i> (<i>k stands for centralize factor</i>)	(Capabilidade do Processo) (K significa fator centralizador)
PDCA	<i>Plan, Do, Check and Act</i>	(Planejar, Fazer, Checar e Agir)
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>	(Análise de Efeitos e Modos de Falha)
O&R	<i>Occurrence and Release</i>	(Ocorrência e Liberação)
FEA	<i>Finite Elements Analysis</i>	(Análise de Elementos Finitos)
CCQ		(Círculos de Controle da Qualidade)
OPL	<i>One Point Lesson</i>	(Lição de um Ponto)
SOP	<i>Standard Operating Procedure</i>	(Procedimento Operacional Padrão)
MP-Info	<i>Maintenance Prevention Information</i>	(Informação para Prevenção de Problemas)
DOE	<i>Design of Experiments</i>	(Delineamento de Experimentos)
MPIF	<i>Metal Powder Industries Federation</i>	(Federação das Indústrias de Metalurgia do Pó)
NC	<i>Normal Compressibility</i>	(Pó com Compressibilidade Normal)
ALD	<i>Atomized Low Density</i>	(Pó Atomizado com baixa densidade)
WIP	<i>Work in process</i>	(Estoque em Processo)
LCS	<i>Logistic and Customer Service</i>	(Logística e Atendimento ao cliente)
EEM	<i>Early Equipment Management</i>	(Gerenciamento Antecipado de Equipamentos)

3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
3.1 Caracterização do produto guia do amortecedor, equipamentos e processo envolvido.....	65
3.2 Detalhar técnica para seleção e priorização de defeitos a serem abordados....	69
3.3 Entender o fenômeno envolvido com o defeito arrancamento com a utilização de técnicas para descrição e estudo do problema.....	69
3.4 Definir a causa raiz do problema.....	69
3.5 Ações corretivas para eliminação da causa raiz.....	69
3.6 Conhecer o principal parâmetro de processo e sua influência no defeito arrancamento.....	69
3.7 Tornar o processo robusto de modo a garantir zero defeito.....	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4.1 Detalhar técnica para seleção e priorização de defeitos a serem abordados....	71
4.2 Entender o fenômeno envolvido com o defeito arrancamento com a utilização de técnicas para descrição e estudo do problema.....	72
4.3 Planejamento das atividades.....	75
4.4 Definir a causa raiz do problema.....	77
4.5 Ações corretivas para eliminação da causa raiz.....	82
4.5.1 Análise dos resultados.....	84
4.6 Conhecer o principal parâmetro de processo e sua influência no defeito arrancamento com uso de delineamento de experimentos (DOE).....	85
4.7 Tornar o processo robusto de modo a garantir zero defeito.....	89
5. CONCLUSÕES.....	92
6. REFERÊNCIAS.....	94

1. INTRODUÇÃO

Diante da globalização da economia, as relações entre clientes e fornecedores procura padronizar as técnicas utilizadas para solução de problemas. Os clientes esperam que seus fornecedores estejam qualificados para resolver problemas de qualidade com técnicas como a análise de *5WeIH*, Diagrama de *Ishikawa*, *5Whys* e acompanhamento de ações corretivas com resultados eficientes e eficazes.

Juran cita a ocorrência de um crescimento da competição pela qualidade, particularmente intensa em nível internacional, de modo que as indústrias reconheçam a importância crescente da função qualidade. A redução de custos tornou-se uma necessidade comum em todos os setores. A indústria está alinhada com esta necessidade e, por este motivo, é um requisito na qualificação de profissionais da área, o conhecimento de técnicas que busquem uma melhoria de resultados da empresa (JURAN, 1991).

Em todos os ramos da indústria, a qualidade é cobrada de maneira sistêmica (JURAN, 1991). A busca pela padronização de técnicas pode ser exemplificada pela unificação de sistemas da qualidade com o uso de normas internacionais para qualificação de fornecedores. A norma NBR ISO 9001 procura unificar os sistemas de gestão da qualidade. Na norma, há um capítulo (10.2) destinado exclusivamente para método de ação corretiva (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). A indústria automobilística trabalha com a norma IATF 16949, onde também se verifica a importância da solução de problemas. Situações em que o produto fornecido não atende as especificações definidas pelo cliente, são consideradas como não conformidades, e estes problemas devem ser solucionados de modo sistêmico para evitar a recorrência (INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE, 2016).

Além das normas relacionadas com sistema da qualidade, um aprofundamento na análise de solução de problemas é requerido pelos clientes, sendo que alguns, chegam a definir seus próprios requisitos para este assunto. Todas as montadoras de veículos possuem manuais de requisitos repassados aos fornecedores de forma contratual, e são parte integrante do contrato inicial de fornecimento. Nas relações entre montadoras de veículos e indústrias de autopeças, os clientes apresentam seus requisitos na fase de cotação do produto. Requisitos relacionados com a qualidade do produto, como por exemplo, o índice de rejeição, atualmente são expressos em partes defeituosas por milhão (ppm), e as metas anuais são revisadas no sentido de diminuir o índice de rejeição. Atualmente é comum clientes da indústria automobilística requisitarem em novos contratos a meta de zero defeitos, sendo a razão desta

busca a redução dos custos da não qualidade que afetam tanto os clientes quanto os fornecedores.

Os custos da não qualidade são elementos que afetam diretamente os resultados das empresas, e as falhas internas e externas são componentes destes custos. Os custos das falhas internas estão associados aos defeitos encontrados antes da transferência do produto ao consumidor, enquanto os custos das falhas externas são encontrados após o produto ter sido enviado ao cliente. O valor financeiro dos custos da não qualidade está diretamente ligado com a fase do processo onde o defeito é detectado, sendo que as falhas internas geram custos menores do que as falhas externas. Um defeito detectado no cliente final seguramente gera um custo maior que o mesmo defeito detectado nas primeiras fases do processo (JURAN, 1991).

Por esta razão, as empresas devem trabalhar com técnicas adequadas para resolver os problemas da qualidade internamente. A busca de técnicas adequadas para sua redução de custos da não qualidade é comum na cadeia de suprimentos, e com a padronização destas técnicas, a relação entre clientes e fornecedores é facilitada e os resultados obtidos refletem diretamente na eficiência das empresas.

O WCM (*World Class Manufacturing*) é também conhecido como Manufatura de Classe Mundial, sendo um modelo de gestão que se baseia em zero desperdício, zero quebra, zero estoque e zero defeito. Yamashina define o WCM como o nível de excelência de todo o ciclo logístico-produtivo, tratando das metodologias aplicadas e do desempenho alcançado pelas melhores organizações mundiais (YAMASHINA, 2000). O WCM se baseia nos conceitos de:

- *Total Productive Maintenance* (TPM).
- *Total Quality Control* (TQC).
- *Just in Time* (JIT).

O modelo WCM atua em todas as áreas da empresa e é dividido em dez pilares técnicos e dez pilares gerenciais. O pilar QCS (*Quality and Customer Safety*) trabalha com o conhecimento dos defeitos, entendimento do fenômeno aplicado ao defeito, classificação e definição da técnica adequada para a solução atingir zero defeitos. Este pilar busca entender as necessidades do cliente e fornecer soluções efetivas em relação aos problemas de qualidade, visando sua satisfação. O pilar QCS contribui com projetos denominados kaizen e tem o objetivo de reduzir custos de não qualidade (FORNO, 2017). Dentre as técnicas utilizadas para redução dos custos da não qualidade, destacam-se as técnicas para solução de problemas. O modelo garante o uso de técnicas conhecidas mundialmente e com potencial de serem aplicadas em toda a cadeia de suprimentos (YAMASHINA, 2000).

Seguindo esta linha, o pilar QCS fornece o suporte necessário a outras áreas em termos de solução de problemas, garantindo a correta aplicação das ferramentas, técnicas e qualidade, de acordo com os critérios definidos pelo WCM (*World Class Manufacturing*). De um modo mais amplo, o pilar QCS consegue definir, juntamente com produção, logística, manutenção e tecnologia, as condições necessárias para evitar não conformidades, bem como manter as condições definidas para garantir a conformidade ao longo do tempo (FORNO, 2017).

Dentro de um contexto em que se busca uma solução padronizada de problemas, o pilar QCS dentro da técnica WCM trabalha com técnicas aceitas pelos clientes. Os resultados dos projetos desenvolvidos dentro da organização reduzem o custo da qualidade interno e pelo fato de buscar zero defeito, conseqüentemente reduzem os custos de falhas externas, e o nível de detalhamento requerido para obtenção de resultados entra em consonância com os requisitos dos clientes. O aprofundamento vertical no detalhamento do fenômeno envolvido com o problema estudado corrobora com o entendimento da situação atual, e facilita as atividades para definição da causa raiz do problema a ser atacado (DI CROCE, 2017).

Técnicas de solução de problemas já conhecidas como o *5G*, *5WeIH*, *Ishikawa* e *5Whys* se juntam com novas técnicas e podem ser utilizadas em projetos para redução de custos da não qualidade. É de extrema importância o gerenciamento destas técnicas de modo a garantir que sua utilização gere resultados financeiros para a empresa. Com o uso destas técnicas, analiticamente, chega-se à causa raiz do problema. Após a comprovação da causa raiz do problema, as ações decorrentes tendem a ser eficazes. A técnica WCM (*World Class Manufacturing*) trabalha para garantir uma sistemática de comprovação da eficácia das ações bem como a garantia de perpetuação sistêmica para evitar recorrência (FORNO, 2017). As técnicas citadas são de conhecimento de todas as empresas do ramo automobilístico, mas seu gerenciamento de forma sistêmica auxilia a obtenção de resultados expressivos na solução de problemas. Este gerenciamento deve incluir a interface com todos os setores envolvidos como por exemplo: segurança, controladoria, manutenção, qualidade, logística, desenvolvimento de produtos, engenharia de processos, recursos humanos, compra de equipamentos e meio ambiente. Em uma visão holística, estes setores são representados por pilares. A técnica WCM (*World Class Manufacturing*), é um modelo de gestão que consegue visualizar as interfaces entre todos os pilares envolvidos, ou seja, todos os setores da empresa. Uma interface importante, é o pilar PD (*People Development*) onde o treinamento e capacitação dos colaboradores é abordado de forma sistêmica. A utilização dos recursos humanos de maneira racional, gera um impacto positivo no clima organizacional da empresa. Neste ambiente, os colaboradores encontram uma maior motivação e assim buscar novos projetos de melhoria. O pilar QCS

(*Quality and Customer Safety*), assim como os demais, está alinhado com a técnica e consegue gerenciar projetos com a participação de todos os setores envolvidos de modo a obter resultados de redução de custos e conseqüentemente, garantir a sobrevivência da empresa (DI CROCE, 2017).

O presente estudo refere-se a problemática focada em um caso da avaliação de um defeito de qualidade em uma empresa de autopeças.

Com a utilização de técnicas como *5WeIH* e *5G*, é possível descrever de forma sistêmica o assunto a ser discutido dando ênfase ao fenômeno envolvido. Ferramentas como a matriz QA, *5WeIH* e *5G*, Diagrama de Ishikawa e *5Whys* foram empregadas nesta dissertação para solução de um modo de falha relacionado ao processo de metalurgia do pó, especificamente a falta de um pedaço da peça antes do processo de sinterização denominado arrancamento.

1.1 Objetivo Geral:

O presente trabalho, tem como objetivo geral a redução de custos de não qualidade com o uso de projeto para redução de refugo no processo de metalurgia do pó, utilizando-se técnica WCM (*World Class Manufacturing*) no pilar QCS (*Quality and Customer Safety*) em indústria de autopeças, ligado a fabricação do componente guia da haste de amortecedores automotivos.

1.2 Objetivos Específicos:

- Caracterizar produto Guia de amortecedor, equipamentos e processo envolvido
- Detalhar técnica para seleção e priorização de defeitos a serem abordados
- Entender o fenômeno envolvido com o defeito arrancamento com o uso de técnicas para descrição e estudo do problema.
- Definir a causa raiz do problema
- Ações corretivas para eliminação da causa raiz.
- Conhecer o principal parâmetro de processo e sua influência no defeito arrancamento.
- Tornar o processo robusto de modo a garantir zero defeito.

1.3 Justificativas

Em um ambiente de forte concorrência, as empresas precisam buscar soluções para redução de custo, e sua sobrevivência está cada dia mais atrelada a soluções ligadas a redução de desperdício, custos de não qualidade e aumento de produtividade. A qualidade pode ser utilizada como uma arma competitiva ao ponto de exigir uma ação conjunta da linha de produção e do pessoal de departamentos auxiliares (SCHONBERGER, 1986). No ambiente automobilístico, as montadoras definem metas para seus fornecedores, os quais devem atender as metas estipuladas, sob o risco de perda de negócio quando as metas não são cumpridas. Baseado na premissa de obtenção de melhores resultados, os fornecedores devem se adequar a esta realidade, gerando projetos de melhoria. Estes projetos precisam estar embasados em uma lógica de priorização, de modo a alocar recursos no ponto correto. Segundo Juran, uma das razões pela qual programas de redução de custo de não qualidade falham, é que nenhuma providência é tomada para se obter fatos necessários ao diagnóstico dos problemas (JURAN, 1991).

As empresas em geral, possuem uma lógica para buscar projetos de melhoria, no entanto, esta lógica nem sempre leva em conta a necessidade de integração de toda a fábrica. Uma falha na obtenção de fatos para diagnóstico de problemas, no planejamento e na priorização, pode levar o uso de recursos em locais onde não se obtém os resultados esperados. Justifica-se então, o uso de projetos de melhoria atrelados a redução de custos com devido gerenciamento pela técnica WCM e conseqüentemente, a garantia de sobrevivência da empresa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Técnica WCM (*World Class Manufacturing*)

O WCM (*World Class Manufacturing*) ou Manufatura de Classe Mundial surge como modelo de gestão bastante eficaz e eficiente. Baseado nos conceitos de zero desperdício, zero quebra, zero defeito e zero estoque, vem apresentando excelentes resultados para as empresas que o adotam (BORGES, 2016). Schomberger cita que o sucesso japonês não é baseado na cultura, sua base é um conjunto de conceitos, princípios, políticas, técnicas de gerência e operação diferentes do ocidental. A convulsão da manufatura começou a ter rejuvenescimento quando operadores e montadores no chão de fábrica começaram a ser donos do seu processo. O ano determinado que pode ser chamado de ponto de virada foi em 1980, onde algumas empresas americanas começaram a renovar seus parques fabris. Os primeiros impulsos de WCM seguiram dois caminhos paralelos: um era o JIT (*Just in Time*) e o outro, o TQC (*Total Quality Control*). O princípio do JIT é quanto menor o tamanho do lote, melhor, e isso levou as empresas possuírem tamanhos de lotes reduzidos (SCHONBERGER, 1986).

A General Electric foi uma das primeiras empresas a lidar com o JIT em 1980. Neste mesmo ano, a empresa Kawasaki no estado de Nebraska e a empresa Caminhões Toyota no estado da Califórnia, ambos nos Estados Unidos, começaram a seguir este procedimento. O segundo preceito é o princípio do TQC (*Total Quality Control*): faça certo da primeira vez. Empresas americanas como a Nashua, a qual contratou W. Edwards Deming, a Tennant e a IBM, as quais contrataram Philip Crosby, seguiram o caminho da qualidade. Por outro lado, um terceiro conjunto de preceitos é o TPM (*Total Productive Maintenance*) ou seja, proceder à manutenção do equipamento tão frequente e eficaz que este dificilmente quebre ou falhe no período de produção, completa os conceitos dominantes do WCM (SCHONBERGER, 1986).

O primeiro passo para a fabricação de classe mundial é implementar TPM com sucesso. Quando o TPM se torna uma prática na produção diária pode-se dizer que a fábrica iniciou uma jornada para fabricação de classe mundial (YAMASHINA, 2000). Na medida do possível, a manutenção da fábrica deveria ser descentralizada, fragmentada em entidades menores e mais controláveis, podendo oferecer serviços de melhor qualidade. Este caminho, leva ao conceito de manutenção profissional (HARMON, 1991).

Os requerimentos básicos para o WCM envolvem a excelência nas áreas de pesquisa, engenharia de produção, capacidade de melhoria e conhecimento detalhado de chão de fábrica,

garantindo a integração de todos como um sistema. Uma vantagem nas empresas japonesas é a qualificação da mão de obra para pré-produção e na melhoria do processo - ou seja, no chão de fábrica onde consegue-se tomar ações no momento da ocorrência de eventuais problemas. As habilidades de engenharia japonesas foram aplicadas de forma mais consistente e intensiva do que no ocidente na gestão da qualidade, valor agregado por funcionário e redução dos prazos de entrega (YAMASHINA, 2000). Uma empresa não pode obter ganhos comerciais apenas usando medidas de corte de custos, porque não pode cortar custos o suficiente para se tornar um concorrente de classe mundial. Em vez disso, deve investir recursos nas áreas certas para fortalecer sua vantagem competitiva. Quando se trata de manufatura, deve-se investir recursos na melhoria da produtividade.

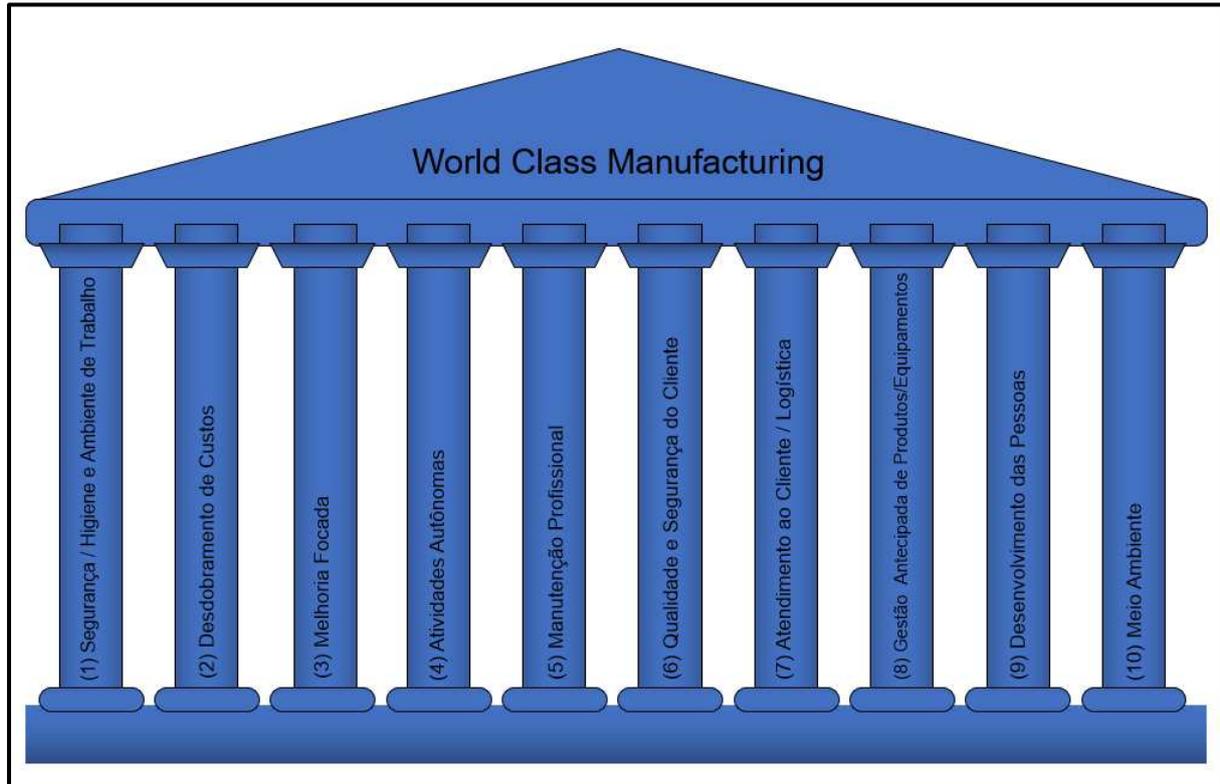
O WCM foi projetado para identificar e destacar problemas e envolver pessoas que são capazes e estão dispostas a resolvê-los. As técnicas são valiosas, mas as pessoas não podem aprender a fazê-las funcionar se não forem desafiadas e apoiadas neste processo de aprendizagem. A implantação de WCM em uma empresa, se inicia com uma política e estratégia que devem ser facilmente compreensíveis e implementadas *TOP DOWN*, ou seja, do topo na alta administração, ao pessoal do chão de fábrica com o constante comprometimento da gestão (DI CROCE, 2017).

2.1.1 Conceitos sobre a técnica

O WCM teve suas origens no Sistema Toyota de Produção. Em 2005, o Dr. Hajime Yamashina, professor emérito da Universidade de Kyoto e membro da RSA (*Royal Swedish Academy of Engineering Sciences*), desenvolveu o WCM junto a empresa Fiat e algumas empresas parceiras. Vale ressaltar que na montadora o WCM é o nome de um programa, não de um arcabouço teórico. Assim, quando Schonberger cita manufatura de classe mundial, não está se referindo ao programa da montadora, ainda que conceitos, técnicas ou até mesmo ferramentas possam convergir (GONÇALVES, 2014).

O WCM é baseado em dez pilares técnicos e dez pilares gerenciais. Cada pilar técnico, possui um conjunto de indicadores denominados KPIs (*Key Performance Indicator*) com suas respectivas metas. Para atingir estas metas, os pilares trabalham com ferramentas aplicáveis à sua gama de ação, gerando projetos de melhoria contínua, avaliados periodicamente com auditorias e/ou análise de seus resultados que devem ser refletidos nos indicadores. Estes indicadores, são avaliados de modo sistêmico pela alta administração. A Figura 1 ilustra os pilares técnicos envolvidos (RAGUSA, 2012), discutidos a seguir:

Figura 1 – Pilares Técnicos do WCM.



Fonte: RAGUSA (2012).

1. Segurança / Higiene e Ambiente de Trabalho: propõe uma melhoria contínua do ambiente de trabalho e a eliminação das condições que podem gerar incidentes, acidentes e lesões.
2. Desdobramento de Custos: definido como um método que inova os sistemas de administração e controle das fábricas, introduzindo uma estreita correlação entre a identificação das áreas a serem melhoradas e os resultados de melhoria de desempenho sendo então, um instrumento confiável para com o uso de resultados financeiros, programar a realização do orçamento da empresa (*Budget*).
3. Melhoria Focada: dedicado a atacar as grandes perdas identificadas pelo desdobramento de custos que tem um forte impacto sobre o *budget* e os KPIs da fábrica e das quais, as soluções resultam em importantes economias.
4. Atividades Autônomas: atividades atribuídas aos operadores sendo divididas em dois tipos, uma em atividades feitas nas máquinas, como por exemplo lubrificação e pequenas regulagens e a outra, na organização do posto de trabalho.

5. **Manutenção Profissional:** compreende todas as atividades relacionadas à construção de um sistema de manutenção capaz de reduzir a zero as quebras e as pequenas paradas das máquinas e de obter economias, por meio da utilização de práticas de manutenção baseada na capacidade de alongar a vida dos componentes (manutenção preditiva).

6. **Qualidade e Segurança do Cliente:** efetua uma mudança na lógica do controle de modo a reduzir a medição de características do produto e transferir o controle para características de processo (exemplo: evitar a medição de dureza no produto, buscando parâmetros de processo no forno que quando avaliados, garantem esta característica). Este pilar trabalha para reduzir variações no processo de modo a atingir zero defeitos.

7. **Atendimento ao Cliente / Logística:** é o conjunto dos fluxos dos materiais que permite satisfazer o cliente, fazendo chegar os componentes e os objetos produzidos no local, no momento, na qualidade e na quantidade correta.

8. **Gestão Antecipada de Produtos/Equipamentos:** tem o objetivo de tornar os equipamentos competitivos por meio da capacidade de antecipar os problemas que as máquinas podem apresentar. Isto é possível no momento do projeto da máquina, quando deve-se considerar a experiência de máquinas anteriores.

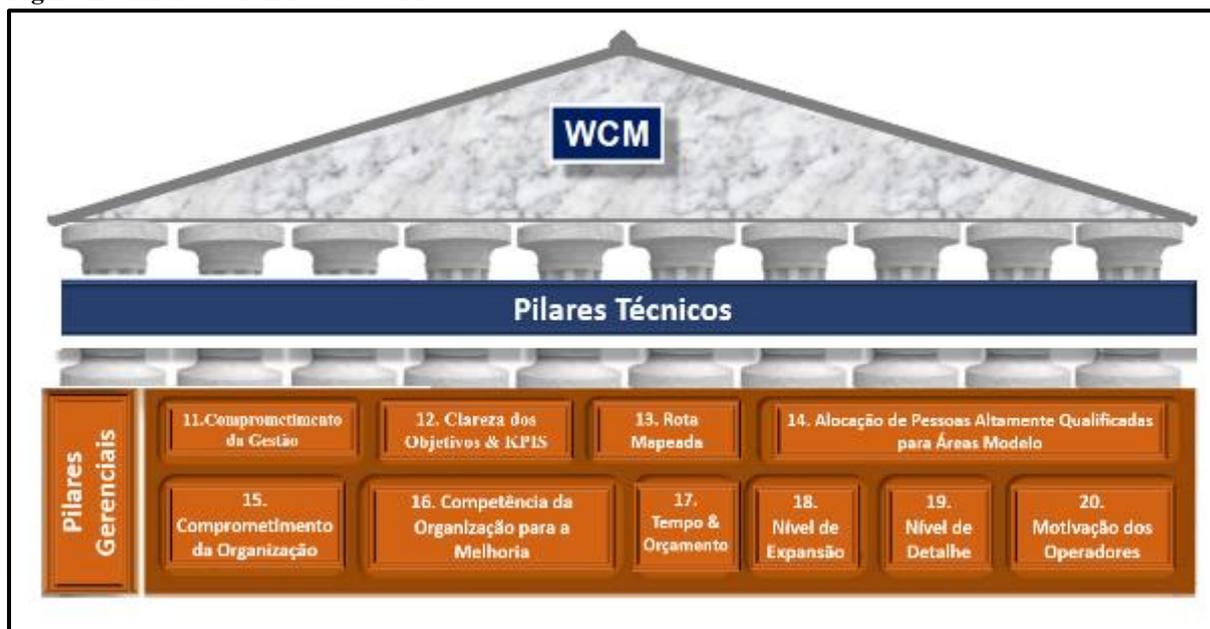
9. **Desenvolvimento das Pessoas:** busca instituir na fábrica, um sistema permanente de desenvolvimento das competências das pessoas, baseado sobre a avaliação contínua dos gaps de competência e sobre a aplicação das modalidades para reduzi-los.

10. **Meio Ambiente:** está relacionado a todo o sistema produtivo através de uma visão orientada para a conscientização e a gestão dos aspectos e impactos ambientais relativos às atividades realizadas. Cada pilar tem sua função na estrutura do WCM, porém, é a interação entre todos pilares de modo sistêmico que faz o funcionamento da técnica. O WCM requer métodos, ferramentas e padrões rigorosos para aplicação que deve resultar na criação de um sistema visível transparente, o que o torna eficaz, pois visa mantê-lo simples.

O mundo ocidental está diante de novas ideias sobre a direção de indústrias. Na América do Norte, estas ideias se espalharam de modo análogo ao Japão: entre gerentes de escalões inferiores e médios. A execução de ideias referentes ao JIT ou Qualidade Total, terá dificuldade de ocorrer enquanto dirigentes mais altos do mundo ocidental, continuarem desinformados da

força destas ideias (SCHONBERGER, 1984). Grandes avanços podem ser atingidos pela simples reorganização de pessoas e equipamentos, mas, uma importante lição aprendida é como estabelecer metas para melhorar a produtividade (HARMON, 1991). Com o WCM, fica claro a importância da gestão e Schonberger cita que uma administração ruim traz más consequências, e o ponto onde encontra-se a resposta para a melhoria de gestão é a supervisão. Com verificações semanais, manter o pessoal ocupado, tornar público os dados de produção, delegação de atividades, envolvimento das pessoas que são levadas a participar registrando os dados de sua operação, com técnicas adequadas de trabalho e trabalho especializado, a gestão consegue obter melhores resultados (SCHONBERGER, 1986). Na implantação do WCM em uma empresa, não basta somente os pilares técnicos: Ragusa demonstra que os pilares técnicos devem ser suportados por pilares gerenciais, os quais são suportados pela alta administração. A Figura 2, mostra os pilares gerenciais (RAGUSA, 2012), discutidos a seguir:

Figura 2 – Pilares Gerenciais do WCM.



Fonte: RAGUSA (2012).

11. Comprometimento da Gestão: neste pilar, a gestão deve ter um modelo de gestão alinhado com o WCM onde liderar pessoas significa liderar mudanças. A alta administração precisa desenvolver a capacidade de visualizar os todos os problemas, participar ativamente das atividades dos pilares, promover reuniões para incorporar as necessidades do programa e ter uma equipe de gestão bem coordenada onde cada pilar entenda as questões dos demais pilares.

12. Clareza dos Objetivos e KPIS: garantir indicadores com metas claras, mensuráveis, com nível de detalhamento a todos envolvidos, incluindo o time de finanças.

13. Rota Mapeada para o WCM: contemplar uma política e estratégia coerente e, com o devido apoio de engenheiros de produção, seja totalmente desdobrada para a empresa.

14. Alocação de Pessoas Altamente Qualificadas para Áreas Modelo: Garantir pessoas competentes em todos os pilares técnicos com bom equilíbrio entre as competências e necessidades do programa.

15. Comprometimento da Organização: Buscar situação onde todas as pessoas na empresa tenham uma atitude que as leva a admitir que existem problemas visíveis, e estão dispostas a resolvê-los.

16. Competência da Organização para a Melhoria: garantir que a empresa tenha a capacidade de usar uma ampla gama de ferramentas e técnicas apropriadas para gerenciamento dos projetos, análise e solução de problemas e organização do aprendizado.

17. Tempo & Orçamento: significa planejamento correto e controle do tempo de todas as atividades em processo contínuo direcionado ao chão de fábrica.

18. Nível de Expansão: está relacionado com a decisão gerencial de como expandir o WCM em todas as áreas, máquinas e processos, chegando ao ponto de envolver os principais fornecedores no programa.

19. Nível de Detalhe: garante a devida estratificação dos dados, até chegar à causa raiz de modo que todos tenham a capacidade de ver, compreender e erradicar facilmente todos os tipos de problema.

20. Motivação dos Operadores: o objetivo é garantir o engajamento das pessoas, trabalhando com o gerenciamento individual de conhecimento, habilidades, flexibilidade e desejos de aprendizagem dos operadores, e a utilização de sistemas coerentes de reconhecimento.

A conquista do status de classe mundial não é um processo rápido, pois integra muitas ferramentas e técnicas, permitindo aos trabalhadores e gerentes o desenvolvimento paulatino de seus conhecimentos e experiências. Inicialmente, as pessoas precisam conhecer, compreender e ganhar experiência usando ferramentas básicas e intermediárias, para posteriormente, fazer uso de ferramentas sofisticadas de maneira adequada. Por esta razão, cada pilar tem seus próprios passos de evolução subdivididos em sete etapas que levam a níveis de desempenho de classe mundial. No entanto, a maneira de evolução do programa como um todo, pode ser demonstrada coletivamente no Quadro 1, envolvendo 7 Princípios WCM, 7 Ferramentas WCM e 7 Passos WCM (FERRANTE, 2016).

Quadro 1 – Princípios, Ferramentas e Passos do WCM.

7 Princípios WCM	7 Ferramentas WCM	7 Passos WCM
1. Visão de perspectiva	1) Priorização	1. Identificar quais problemas precisam ser resolvidos
2. Visualização em todos níveis da operação	2) Implantação sistemática, lógica e detalhada	2. Detecte onde eles estão
3. Utilização Método / ferramenta correta	3) Descrição do problema com esboços	3. Priorize-os com base no custo de implantação
4. Conceito ideal para zero acidentes, quebras de máquinas, defeitos, erros humanos, estoques e reclamações de cliente	4) 5W + 1H com os princípios 5G	4. Analise-os e escolha os métodos corretos
5. Contramedidas contra as causas raízes, não contra os sintomas	5) Análise de causa raiz	5. Estimar quanto custam para serem resolvidos
6. Orientação no detalhe	6) Descrição dos fenômenos com esboços	6. Implementar soluções com rigor
7. Orientado para tempo real	7) TWTP (<i>The Way to Teach People</i>) - A maneira de ensinar as pessoas	7. Avalie os resultados alcançados em relação ao objetivo original

Fonte: FERRANTE (2016).

2.1.2 Conceitos sobre o Pilar QCS (*Quality and Customer Safety*)

Do modo análogo a todos os pilares técnicos, o pilar QCS trabalha com uma missão e resultados esperados, isto é, um crescimento da satisfação dos clientes, uma redução significativa nos custos de não qualidade, a difusão das habilidades para solução de problemas em toda empresa e a melhoria contínua dos processos na busca pelo zero defeito. A missão normalmente é ajustada à empresa onde o pilar é implantado, mas em linhas gerais, busca-se garantir produtos de qualidade aos clientes a custos mínimos, garantir as condições necessárias para prevenir não conformidades, bem como manter as condições definidas para garantir a

conformidade ao longo do tempo e o aumento da habilidade dos operadores para solução de problemas, visando atingir zero defeito (FORNO, 2017).

Segundo Ergest, o pilar QCS trabalha com 10 pontos de vista, descritos a seguir (ERGEST, 2014):

1º. Cliente em primeiro lugar (tudo é para o cliente): com abordagem do cliente sempre ter a razão, as saídas do processo e os padrões em linha conforme a expectativa do cliente, bem como levar em conta que a satisfação do cliente final pode ser alcançada por meio da satisfação do cliente interno.

2º. O próximo processo é o seu cliente (fluxo livre de defeitos): o foco é o cliente interno, de modo que as ações devam ser realizadas de acordo com a expectativa do próximo processo, com peças boas na hora e local correto em um processo livre de defeitos e com KPIs adequados.

3º. Mente de qualidade (em todas as fases): com visão de proteger o cliente, eliminação de desperdício, busca de design do produto e processo robusto, solução efetiva dos problemas e consideração de todos possíveis efeitos nas decisões sobre a qualidade.

4º. Gerenciamento por fato (fato é fato): gestão onde não significa tomar decisões com base apenas na experiência e intuição, mas agir com base em fatos independente das verdades pessoais. Deve-se primeiro quantificar a situação na forma de dados e convertê-la em informações valiosas nas quais as decisões devem se basear.

5º. A roda PDCA (para melhoria contínua): o ciclo PDCA é uma ferramenta de melhoria contínua e deve evoluir ao longo do tempo. A fase PLANEJAR (*PLAN*) deve levar em conta um estudo detalhado do fenômeno envolvido, análise de causa e seleção da melhor ação, a definição de metas, a alocação correta de recursos, clarificação de KPIS, definição de tarefas, padrões, responsabilidades e cronogramas. A fase FAZER (*DO*), significa estudar os padrões e métodos a serem utilizados para garantir a execução do plano de modo correto. A fase CHECAR (*CHECK*) deve garantir uma verificação completa dos resultados com a análise cruzada entre o trabalho real e os métodos e padrões, comparação do resultado com o objetivo, coleta de dados que gerem informações significativas relacionadas ao resultado. Se a meta não for alcançada, deve-se voltar ao planejamento. A fase AGIR (*ACT*) deve garantir a

padronização da medida eficaz e a correta expansão para garantir a abrangência em outras áreas.

6°. Priorização (para grande efeito em curto espaço de tempo): deve ser garantida a colocação de problemas / atividades / ações em ordem de importância levando em conta a severidade do problema, o impacto no cliente, a reputação da empresa, a contribuição para as metas e KPIs e a frequência de ocorrência. A priorização deve focar em fatores com influência significativa nas características da qualidade, nos que auxiliam para atingir as metas, nos possíveis obstáculos para alcance dos objetivos e nos itens para fortalecer a organização da empresa no futuro.

7°. Controle de Processo (Definir Entradas / Parâmetros Críticos): neste ponto de vista, o foco deve ser em parâmetros do processo. No WCM, a medição no produto deve ser considerada como a saída do processo (*Output*) e procura-se encontrar nos parâmetros de máquina (exemplo: pressão, temperatura, velocidade, etc.) considerados como entradas (*Input*), o melhor ponto para padronização de controles. Busca-se padronização que garanta repetibilidade e reprodutibilidade nas medições e a meta de zero desperdício. Deve-se gerenciar as eventuais mudanças com devido cuidado para garantir o retorno de informações ao projeto do processo.

8°. Controle de dispersão (para entradas / parâmetros críticos): a dispersão é inevitável, no entanto, deve estar dentro de um limite aceitável. Deve-se manter a dispersão próxima ao alvo e dentro da tolerância com controle estatístico do processo. Um KPI do pilar QCS é o índice de capacidade do processo, em que se monitora o CP – CPK > 1,33.

9°. Prevenção de recorrência (causa raiz real - contramedida eficaz): para padronizar a contramedida eficaz contra a causa real de modo a não enfrentar o mesmo problema novamente. Existem contramedidas de emergência resumidas em ações de contenção como inspeções, retrabalho, etc. Na sequência, deve-se buscar contramedidas permanentes com a padronização para lidar com a causa raiz do problema. Por fim, trabalhar com contramedidas sistêmicas como ações de abrangência, métodos de trabalho, mecanismos, procedimentos, cultura e retroalimentação do sistema.

10º. Padronização (para aprendizagem organizacional): deve ser encarada como uma forma de ensinar a organização e não as pessoas. A padronização deve ser no projeto, processo, treinamento, máquinas, material, método e ambiente de modo que todas as oportunidades de melhora sejam percebidas pela organização.

O pilar QCS busca encontrar a condição de zero defeitos. Este conceito, leva aos trabalhadores, a própria tarefa de controlar o processo industrial (SCHONBERGER, 1984). Não se deve confundir o conceito de zero defeitos com o perfeccionismo, frequentemente considerado como exageros de projeto. Um exemplo comum de perfeccionismo são produtos que se tornam obsoletos antes de se desgastarem. A defesa contra o perfeccionismo, é quantificar e dramatizar os custos envolvidos (JURAN, 1991). O programa zero defeitos, visa um produto ou serviço livre de defeitos, sendo utilizado em campanhas pela melhoria da qualidade. A base para este programa são os 14 princípios de Deming e as 14 etapas de P. Crosby que podem ser resumidos em envolvimento e capacitação de pessoas, implementação de nova filosofia e cultura voltadas para qualidade, estabelecimento de metas, uso de técnicas adequadas e utilização do ciclo PDCA (MARTINS, 2011). O conceito de zero defeitos no pilar QCS é implantar projetos que ataquem a causa raiz do problema estudado de modo a zerar a ocorrência da falha de qualidade decorrente causa atacada (ERGEST, 2014).

A fabricação simplificada, conceito central do WCM, é parte integrante do pilar QCS onde setores de manutenção, contabilidade, administração de materiais, engenharia e compras se juntam a qualidade para trabalhar em conjunto em projetos de melhoria (SCHONBERGER, 1986). O conceito de equipe é reforçado com a necessidade de envolvimento de toda empresa em projetos da qualidade. Os times devem tomar ações consistentes baseado em técnicas adequadas. Para obter resultados esperados, as pessoas devem ser capacitadas e movidas pela integração de todos os setores. A coordenação dos treinamentos e integração é centralizada na área de recursos humanos (MARTINS, 2011).

2.1.3 Ferramentas da Qualidade

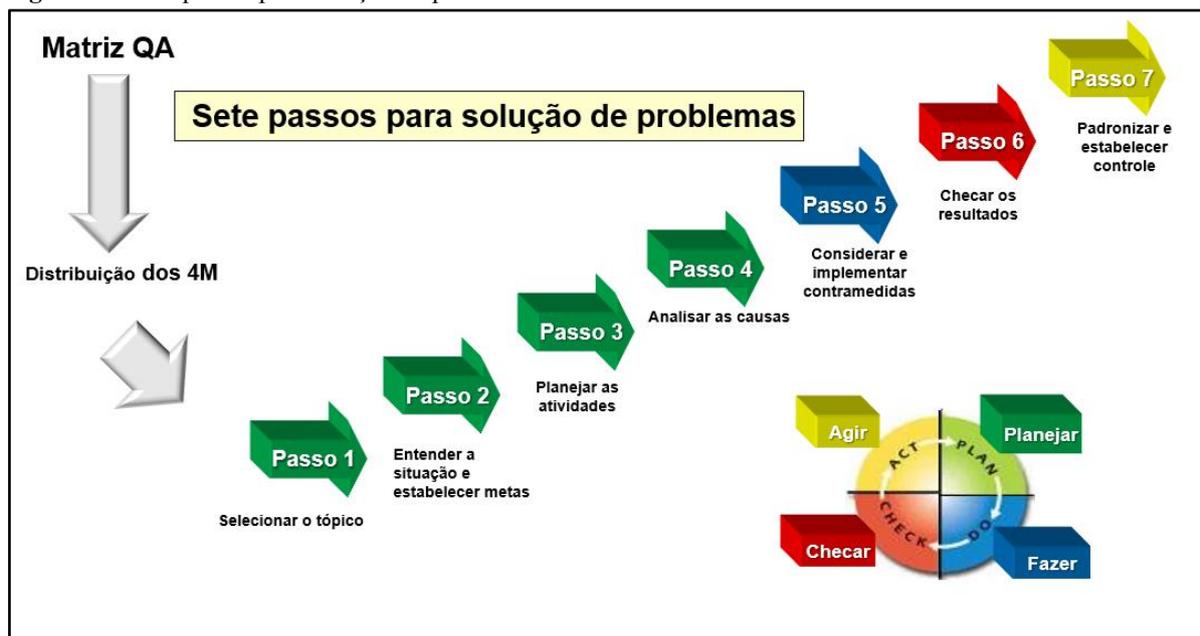
As competências envolvidas para o pilar QCS estão relacionadas com a abordagem utilizada. A abordagem pode ser reativa, quando os defeitos que já ocorreram (inclui ações para evitar a repetição do defeito do mesmo produto), preventiva, onde é dada abrangência das ações reativas para processos e produtos similares, e por fim proativa, onde são avaliados os defeitos que ainda não ocorreram e são considerados defeitos teóricos, os quais podem ser

identificados por meio de aplicação de ferramentas avançadas como Análise de Efeitos de Modo de Falha (FMEA), Ocorrência e Liberação (O&R), Análise de Elementos Finitos (FEA), etc. Um problema teórico pode ser considerado durante ou antes do início da produção. No início da implantação da técnica, a empresa trabalha na abordagem reativa. As ferramentas da qualidade e o treinamento dos envolvidos, segue a evolução da implementação do WCM na empresa (ERGEST, 2014).

2.1.3.1 Sete passos para solução de problema de método

Assim como os demais pilares, o pilar QCS trabalha de modo sistêmico para solução de problemas. Seguindo a técnica WCM, é utilizada uma ferramenta dividida em 7 passos com o objetivo de chegar a zero defeitos relacionados a causa estudada. A Figura 3, demonstra esquematicamente cada passo envolvido (FORNO, 2017).

Figura 3 – Sete passos para solução de problemas.



Fonte: FORNO (2017).

O primeiro passo (1), consiste em identificar o problema e escolher o defeito a ser atacado nesta fase, utiliza-se as saídas da matriz QA onde pode-se identificar os principais defeitos e a porcentagem de contribuição dos 4Ms distribuídos em cada processo da fábrica. No segundo passo (2), entende-se a situação, utilizando as ferramentas 5G e 5W1H com a coleta de dados e a definição de metas. No terceiro passo (3), planeja-se o que fazer com a definição

de cronograma e a atribuição de responsabilidades. No quarto passo (4), utiliza-se as ferramentas 4M e 5*Whys* onde são classificadas as possíveis causas e a decisão de qual argumento para enfrentar. No quinto passo (5), busca-se considerar os detalhes das contramedidas, planejar e garantir a correta e total implementação das ações propostas. No sexto passo (6), verifica-se os resultados comparando com as metas definidas de modo a identificar os benefícios obtidos. No sétimo passo (7), trabalha-se com a criação de novos padrões / revisão dos antigos, a definição e estabelecimento de métodos de controle para garantir zero defeito e o treinamento de pessoas (ANTONINI, 2018).

2.1.3.2 Matriz QA

A Matriz de QA (*Quality Assurance*) é uma ferramenta usada pelo Pilar de Controle de Qualidade para definir as prioridades adequadas a fim de eliminar não conformidades do produto e melhorar processo. Trata-se de uma tabela onde são coletadas todas as não conformidade internas e externas como por exemplo: peças refugadas no processo, retrabalhos, reclamações de clientes e peças em garantia. As não conformidades citadas, podem ser acrescidas de reuniões da qualidade e dados de suporte como por exemplo: análise de custos dos defeitos e classificação da severidade dos problemas (FORNO, 2017).

O conjunto de dados é chamado de entradas (*Inputs*) e são tabulados de modo a criar a priorização de ataque. A priorização leva em conta a frequência da ocorrência (F) onde são atribuídas para cada defeito analisado, notas de 1 até 5, correlacionadas com a porcentagem do defeito nos últimos 12 meses. Na mesma linha de raciocínio, é utilizada para os custos (C) de cada linha da matriz onde é atribuído uma nota para cada faixa de custo do defeito avaliado. A nota de severidade (S) leva em consideração o impacto do defeito no cliente. Para defeito que possa gerar um risco de segurança no produto final, deve-se atribuir nota 5. A nota de detecção (D) leva em consideração onde o defeito é detectado de modo a que quanto mais próximo do cliente final, maior deverá ser a nota. Por fim, os quatro índices são multiplicados para obter o índice de prioridade (P), demonstrado na Equação 1.

$$(P) = (F)*(C)*(S)*(D) \quad (1)$$

Em cada linha da matriz QA, encontra-se um defeito que deve ser analisado buscando a correlação do mesmo com uma classificação de 4Ms. Esta classificação, verifica se o defeito está relacionado com um problema de Máquina, Método, Mão de Obra ou Material. Com o

não serão propriamente tomadas. O problema, é a diferença entre a situação atual e a ideal sendo considerado um sintoma perceptível no processo que pode ser definido como uma questão da qual será necessário dar uma resposta, e encontrar uma solução.

Por meio da percepção do problema, é possível avaliar os fenômenos por trás dele e então investigar a causa raiz. Por outro lado, o fenômeno é o evento físico que gera o problema e pode ser percebido com nossos sentidos, medido ou observado, sendo o agente da transformação de algo. Como exemplo da diferenciação entre os conceitos, pode ser citada a cavitação, um fenômeno originado em quedas repentinas de pressão, geralmente observado em sistemas hidráulicos. A combinação entre a pressão, temperatura e velocidade resulta na liberação de ondas de choque e micro jatos altamente energéticos, causando a aparição de altas tensões mecânicas e elevação da temperatura. O problema gerado pela cavitação, é a perda máquina quebrada, por um rotor danificado (DI CROCE, 2017).

As ferramentas *5WHY* e *5G* são utilizadas em conjunto para descrever o problema e o fenômeno envolvido. Após a priorização do defeito a ser atacado pela matriz QA, o primeiro passo é ir até o ponto de processamento do processo utilizando a ferramenta *5G*. Isso auxilia a compreender os fatos para tomada de decisão. Deve-se observar o processo ou problema no local onde está ocorrendo e quantificar a situação na forma de dados, convertendo-os em informações valiosas nas quais se baseará a decisão (FORNO, 2017). O Quadro 2 demonstra esquematicamente os passos para utilização da técnica *5G*.

Quadro 2 – Ferramenta *5G*.

Teoria		Ações	
GEMBA	Local real	Vá para o local	Local de trabalho onde o evento está acontecendo
GEMBUTSU	Coisas reais	Examine o objeto	Descreva as condições iniciais, irregularidades encontradas (part number, modelo, máquina/equipamento)
GENJITSU	Fatos reais	Cheque os fatos e números	Colete dados (turno, criticidade, dimensionamento de peças, frequência, horas paradas, retrabalho) e avalie o fenômeno com seus próprios olhos.
GENRI	Princípios	Consulte a teoria	Compare com a teoria (normas, desenhos...)
GENSOKU	Normas e parâmetros	Siga os padrões	Siga os padrões e parâmetros (valores físicos)

Fonte: FORNO (2017).

O *5W1H*, durante o *GEMBA* e com auxílio do uso do *5G*, ajuda a descrever claramente o fenômeno oculto por trás de um problema. Esta ferramenta, responde as questões: *What* (O quê), *When* (Quando), *Where* (Onde), *Who* (Quem), *Which* (Qual) e *How* (Como). Para cada situação, a resposta para as questões citadas, dependerá do processo analisado. O Quadro 3 pode ser utilizado como um guia para exemplificar a maneira com a qual as questões serão elaboradas, porém, pode ser adaptado para cada problema analisado. Existem formulários com um campo para descrever o fenômeno revisado e este é o objetivo do uso desta técnica (FORNO, 2017).

Quadro 3 – Ferramenta 5W1H.

5W1H		Analisar	
What	O quê	O que faz?	Qual produto, máquina, material estava sendo utilizado? Qual é o tamanho?
When	Quando	Quando este fenômeno ocorre?	Quando, na sequência da operação; inicialização, operação, problema intermitente, parada, setup?
Where	Onde	Onde este fenômeno ocorre?	Onde, no equipamento ou material este fenômeno é observado?
Who	Quem	Quem é afetado?	Todos? Ou este problema afeta alguns individualmente ou coletivo?(Em caso afirmativo, quais informações eles podem oferecer?) Trata-se de habilidades relacionadas?
Which	Qual	Qual os padrões e tendências que os fenômenos seguem?	É o fenômeno mais frequente na Segunda-feira pela manhã? Depois de uma mudança? Ou é de natureza aleatória? Qual sentido os fenômenos acontecem?(Nota: Não há muitos fenômenos verdadeiramente aleatórios
How	Como	Como os equipamentos saíram do ideal?	Quantas vezes o problema ocorre? Quanto custa este problema?

Fonte: FORNO (2017).

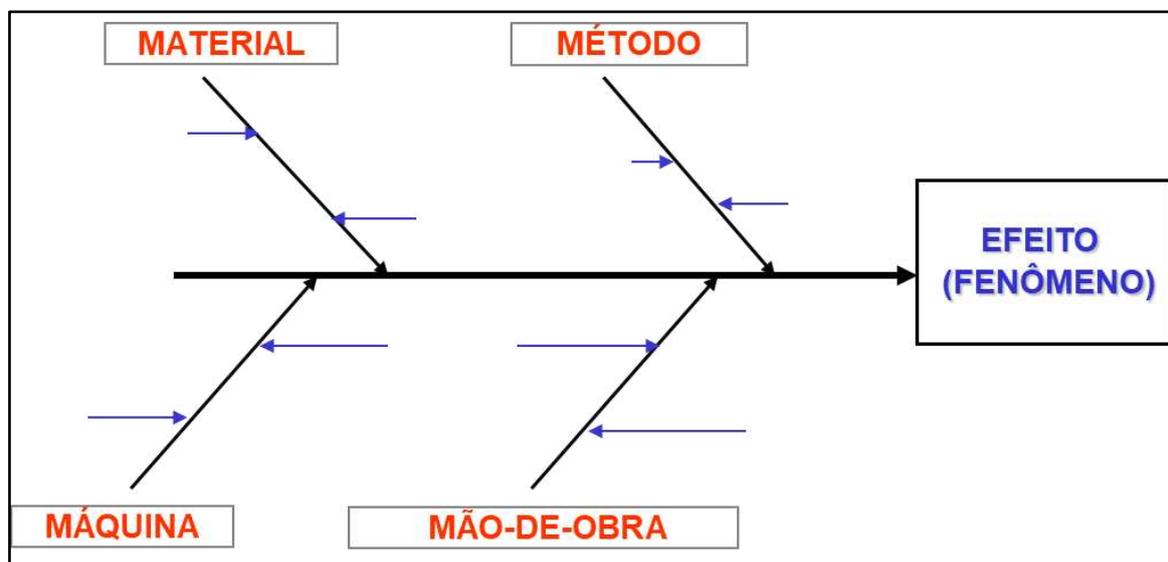
Assim como todas as ferramentas da qualidade, as técnicas utilizadas sofrem evolução. Atualmente, encontram-se disponíveis quadros onde foi acrescentado as perguntas “*How Much*” (quanto custa) e “*Wins*” (ganhos relacionados a resultados e benefícios). Com esta evolução, a ferramenta passa a se chamar *6W2H*. Este tipo de evolução é bem-vinda, porém,

para a resolução de um problema, seguindo a técnica WCM, espera-se primordialmente que a ferramenta atinja o objetivo de descrever o fenômeno (PROPRIO AUTOR, 2021).

2.1.3.4 Diagrama de Causa e Efeito - 4M

Nascido em 1915, Ishikawa foi um dos grandes tradutores das teorias norte-americanas para a realidade da cultura japonesa. Ficou conhecido, especialmente, pela difusão dos Círculos de Controle de Qualidade (CCQ) e pela criação do diagrama de causa e efeito. Também chamado de diagrama de Ishikawa ou espinha de peixe (por causa de seu formato), o diagrama de causa-efeito é usado para demonstrar a relação entre as causas e os efeitos de um processo. Aplica-se esse diagrama quando o efeito de um processo é problemático, isto é, quando o processo não gera o efeito desejado (PEARSON, 2019). O pilar QCS, utiliza esta ferramenta com a denominação 4M, onde busca-se procurar as causas de um fenômeno concentrando o estudo em Máquina, Mão de Obra, Método e Material. A Figura 4, exemplifica o diagrama 4M (ERGEST, 2014).

Figura 4 – Diagrama 4 M.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A técnica consiste em formar um grupo que de posse do conhecimento do fenômeno, escolhe um líder que deve estimular todos os participantes a contribuir com o preenchimento de todas as ramificações do diagrama com os fatores que possam causar o efeito. Esta fase,

usualmente chamada de *brainstorming* (ou tempestade de ideias), nenhuma ideia pode ser censurada. Considera-se que o M (Mão de Obra), está relacionado a erro humano onde o operador não segue o método definido; o M (Método), é classificado quando as definições da maneira com a qual o processo deve ser seguido, não garante bons resultados; o M (Material), está relacionado com causas oriundas do material não conforme recebido de fornecedor externo ou interno e o M (Máquina), é utilizado em causas onde o equipamento utilizado declinou / diminuiu em desempenho e está contribuindo para ocorrência do efeito estudado.

O Quadro 4, pode ser utilizado como um guia para direcionar a escolha de cada “M”. Após o preenchimento das possíveis causas, o grupo deve discutir e selecionar as causas mais importantes para o assunto em estudo (ANTONINI, 2018). Na técnica, todo problema tem causas específicas, e essas causas devem ser analisadas e testadas a fim de comprovar qual delas está realmente causando o efeito que se quer eliminar. Eliminado as causas, elimina-se o problema (COSTA, 2018).

Quadro 4 – Guia para 4M.

Mão obra	<ul style="list-style-type: none"> ●Os trabalhadores estão observando os padrões? ●Eles estão trabalhando com eficiência? ●Eles tem problemas de conscientização? ●Eles tem um forte senso de responsabilidade? ●Eles são habilitados? ●Eles são experientes? ●Eles estão designados para o trabalho certo? ●Eles querem melhorar? ●As relações são boas? ●Eles são saudáveis? 	Materiais	<ul style="list-style-type: none"> ●A quantidade está certa? ●A sua classe está certa? ●A marca está certa? ●Eles estão livres de impurezas? ●Eles estão estocados na quantidade certa? ●Eles são usados sem desperdício? ●Eles estão sendo manuseados corretamente? ●Os materiais em processamento estão espalhados? ●Eles estão distribuídos corretamente? ●O nível de qualidade é satisfatório? ●Eles são apropriados? ●Eles estão bem organizados?
Máquinas	<ul style="list-style-type: none"> ●Elas atendem aos requisitos de produção? ●Elas atendem às capacidades do processo? ●Elas estão sendo apropriadamente lubrificadas? ●Elas estão sendo inspecionadas? ●Elas estão livres de pequenas quebras? ●Elas são suficientemente precisas? ●Elas estão livre de ruídos anormais? 	Métodos	<ul style="list-style-type: none"> ●O padrão de trabalho é satisfatório? ●O padrão de trabalho é mantido em dia? ●Os métodos são seguros? ●Os métodos garantem um bom produto? ●Os métodos são eficientes? ●A sequência de trabalho é apropriada? ●A temperatura e a umidade são satisfatórias? ●A iluminação e a ventilação são adequadas? ●Existe uma boa ligação entre o processo anterior e o subsequente? ●O equipamento de medição é adequado e está aferido?

Fonte: ANTONINI (2018).

O diagrama de Causa e efeito, pode ser encontrado no formato de 6M onde é incluído a Medição e Meio ambiente. Na simplificação da técnica WCM, estas causas se encaixam em Método. Independente da nomenclatura utilizada para cada “M”, o objetivo principal da técnica, é servir de guia para se chegar à causa raiz do fenômeno. As saídas do diagrama, devem ser utilizadas na técnica *5Whys* (PROPRIO AUTOR, 2021).

2.1.3.5 5 Whys

O método dos 5 porquês (*5 Whys*) é uma abordagem científica, utilizada no sistema Toyota de Produção, para se chegar à verdadeira causa raiz do problema, que geralmente está escondida por meio de sintomas óbvios. É uma ferramenta simples de resolução de problemas que foi desenvolvida por Taiichi Ono, pai do Sistema de Produção Toyota (COSTA, 2018). Após selecionadas as causas mais importantes (4 M), a ferramenta consiste em aprofundar o estudo, até chegar à causa raiz. Inicia-se perguntando: “Por que isso aconteceu?” e continuar com a mesma pergunta até encontrar a causa raiz. Cinco é apenas um número de referência de vezes para perguntar, mas pode ser mais ou menos vezes. Deve-se evitar de parar no primeiro porquê, em função do risco de não se encontrar a verdadeira causa raiz do problema (ANTONINI, 2018).

2.1.3.6 Padronização do Processo e Cinco Questões para Zero Defeito

Seguindo a linha de raciocínio do sétimo passo para solução de um problema de método, uma vez que uma solução foi verificada e resultou eficaz, deve ser padronizada e expandida para áreas semelhantes da planta para necessidades atuais e futuras. O método deve ser padronizado porque se o padrão existe, mas não é usado, então isso significa que está colocado no ponto errado, não explica como fazer o trabalho corretamente ou não é possível seguir conforme descrito. Caso o padrão não exista, os operadores realizam seus trabalhos de sua própria maneira, resultando na flutuação das condições e, portanto, na mudança da qualidade (DI CROCE, 2017). A documentação do processo deve ser revisada e, segundo Antonini, a padronização pode ser com o uso de: (ANTONINI, 2018):

- Lição de um ponto (OPL - *One Point Lesson*): uma ferramenta visual simples e eficaz usada para fins de treinamento. Apresenta uma única aula, é fácil de entender e deve ser possível

aprendê-la em no máximo 5 a 10 minutos. A OPL, deve mostrar claramente duas condições: correto e incorreto. A Figura 5 mostra um exemplo de utilização desta ferramenta (ANTONINI, 2018).

Figura 5 – Lição de um Ponto (OPL).

		LIÇÃO DE UM PONTO (OPL)			Setor / OPL Nº CO- 001	
TEMA: Rastreabilidade – Amostras de Liberação de varetas						
<input checked="" type="checkbox"/> CONHECIMENTO BÁSICO		<input type="checkbox"/> PROBLEMA		<input type="checkbox"/> MELHORIA		
		← ERRADO				
→ CORRETO						
PROBLEMA : Falta de rastreabilidade para peças de liberação de máquina. Amostras sem identificação		SOLUÇÃO : Amostras de liberação devem ser validadas pela qualidade na ficha de registro com emissão de Etiqueta no RAD. Acondicionar em sacos plásticos e alocar ordenadamente em caçamba durante um mês				
Elaboração / Data: Paulo Henrique - 26/08/2021		Aprovação / Data: Paulo Castilho - 26/08/2021		Data limite para exibição: 26/11/2021		Instrutor(es): Paulo Castilho / Marcos Sousa

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

• Procedimento Operacional Padrão (SOP - *Standard Operating Procedure*) é uma ferramenta usada para descrever como realizar uma tarefa. Usando imagens e texto, explica passo a passo, a maneira certa de fazer um trabalho. A SOP deve ser 80% visual. A Figura 6 demonstra esquematicamente como deve ser elaborada uma SOP (ANTONINI, 2018).

Figura 6 – Procedimento operacional padrão (SOP).

CABEÇALHO		SOP		Cód. Componente: _____			Descrição da operação: _____			Área / Linha: _____		Nº da máquina: _____		Tipo: PROC		Página: _____		
Equipe: _____		Elaboração: _____		Data liberação: _____		Aprovação: _____		Assinatura(s): _____			EPI's: ③ ④ ⑤		C.C.: _____		Tempo ciclo: _____		Legenda: PROC = Produto PROC = Processo CONT = Controle	
Diagrama de fluxo				Área para figuras referentes à operação														
Área para diagrama de fluxo																		
Componentes		Ferramentas																
Ref. Qtdde. Item		Área para componentes e ferramentas aplicáveis a operação																
Passo		Descrição (O Quê?)			Tempo (s) Trab. Máq. Desl.			Ação (Como?)				Porquê?			Ponto de atenção			
ÁREA PARA EXPLICAR A OPERAÇÃO USANDO AS FIGURAS COMO REFERÊNCIA																		
TOTAL (s)					0 0 0			ANOTAR O TEMPO CICLO DA OPERAÇÃO										
CICLO TOTAL (s)					0													
Legenda:		Segurança do operador		Ambiente		Check de Qualidade		Processo/ Característica Crítica		Característica de segurança								

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

• Informação para Prevenção de Problemas (MP-Info - *Maintenance Prevention Information*) é uma ferramenta para descrever as mudanças / melhorias feitas em um equipamento. Cada MP Info deve ser analisado para determinar se é possível aplicá-lo em outros equipamentos, especialmente para o novo equipamento em desenvolvimento. Ela é utilizada para documentar soluções de problemas encontrados, demonstrar visualmente o problema e a solução e auxiliar de forma preventiva novos projetos. A Figura 7 demonstra esquematicamente uma MP-Info (ANTONINI, 2018).

Figura 7 – Informação para Prevenção de Problemas.

OBJETIVO DA MODIFICAÇÃO	Maintenance Prevention Information	PLANTA	BUSINESS LINE	PRODUTO	PROCESSO PRODUTIVO	Nº MP_Info RESPONSÁVEL	WCM
		CENTRALINA - PWT				DATA	
EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO EQUIPAMENTO			Nº OPERAÇÃO	LINHA / CÉLULA	ATIVO - MI	VALIDAÇÃO
IMPACTO	SEGURANÇA	MANUTENÇÃO AUT.	LOGÍSTICA	ABRANGÊNCIA		PILAR EMITENTE	
	QUALIDADE	OPERABILIDADE	MEIO AMBIENTE				
	CONFIABILIDADE	FLEXIBILIDADE	ENERGIA				
	MANUTENIBILIDADE	DIAGNOSE	CUSTO				
PROBLEMA				SOLUÇÃO			
EVIDÊNCIAR A SITUAÇÃO ATUAL (ANTES)				EVIDÊNCIAR A SITUAÇÃO PROPOSTA (DEPOIS)			
HISTÓRICO				RESULTADOS			
PERÍODO	INDICADORES	OBSERVAÇÃO		PERÍODO	INDICADORES	OBSERVAÇÃO	

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

O fechamento da padronização consiste em garantir que as ações tomadas na causa avaliada serão suficientes para zero defeitos. A ferramenta utilizada, as Cinco Questões para Zero Defeitos, geram o número *Q-Factor*. Cinco Questões para Zero Defeitos precisam ser aplicadas para validar a robustez do processo real e a eficácia de todas as ações de melhoria. As questões são específicas para cada M, mas segue sempre a mesma abordagem (1) Definição de Padrão, (2) GAP, (3) Variação / Eficácia, (4) Localização e (5) Recuperação. Para cada questão, são definidas três situações com pontuação: situação em que não se garante o zero defeito (nota 1), situação intermediária (nota 3) e onde o zero defeito é garantido (nota 5). Por

fim, é calculado o *Q-Factor* de acordo com a Equação 2, onde uma pontuação mínima de 84% é considerada robusta e sustentável. (FORNO, 2017).

$$QFactor = \frac{\sum_{i=1}^5 \text{Nota da questão } i}{25} \geq 84\% \quad (2)$$

Situações em que o valor de *Q-Factor* é menor que 84%, devem ser geradas ações de melhoria. Uma nova rodada de questões deve ocorrer até atingir o valor estipulado maior ou igual a 84%. A Tabela 2 mostra o exemplo com as questões para o “M” Método (ANTONINI, 2018).

TABELA 2 – Cinco Questões para Zero Defeito.

MÉTODO	RESPOSTAS		
	1	3	5
Este padrão (Instrução de Trabalho) está claramente definida? (Facilidade do método a seguir)	Não existe um padrão (O método é difícil de entender e precisa de alta consciência do operador)	Existe um padrão, mas falham em detalhes e ajudas visuais não existem ainda. (O método é fácil de entender, mas requer alta consciência do operador)	Existe uma detalhada SOP Visual (80% visual) que todos operadores podem facilmente compreender. (O método é fácil de entender e não requer alta consciência do operador)
É possível seguir o padrão estabelecido? (A eliminação de GAP de treinamento é de fácil execução?)	Não é possível seguir o padrão (O treinamento necessário de habilidades ou métodos desenvolvidos off-line não é possível seguir)	É possível seguir o padrão, porém é difícil (O treinamento não é fácil, mas pode ser feito na linha de produção na velocidade da linha. Alguns defeitos são possíveis durante o treinamento).	É fácil de seguir o padrão (O treinamento é feito facilmente enquanto a linha está funcionando na estação)
O padrão é eficaz? (Existe possibilidade de variação?)	Não o suficiente, alto risco de erro. A atividade muda e nenhuma direção ativa (digital / sensorial) é fornecida ao operador	É eficaz, mas ainda existe uma margem de erro. A atividade muda, mas a direção ativa (digital / sensorial) é dada quando a mudança ocorre	Em 100% dos casos, a qualidade é garantida. A atividade é a mesma para cada unidade
Onde o padrão está localizado? (Facilidade de visualização pelo operador)	O padrão está disponível, mas não é visível da estação de trabalho.	O padrão está na estação de trabalho e visível, mas não na linha de visão do operador.	Padrão está na estação de trabalho, é claramente visível e está na linha de visão do operador quando executa seu trabalho
O operador está envolvido na definição do padrão? (A participação está relacionada a receber feedback caso de falhas)	O operador não está envolvido com a geração do padrão. (Nenhum feedback está presente na estação de trabalho)	O operador da estação revisou e aprovou a instrução de trabalho. (O feedback de um defeito é óbvio na estação de trabalho)	O Operador estava diretamente envolvido com o conteúdo do padrão e aprovou o documento (Feedback automatizado - digital)

Fonte: ANTONINI (2018).

2.2 Delineamento de Experimentos

Engenheiros aprendem sobre mecanismos físicos e seus modelos subjacentes no início de sua formação acadêmica e durante sua carreira profissional, com envolvimento na manipulação destes modelos. Experimentos projetados estatisticamente oferecem ao engenheiro uma base válida para o desenvolvimento empírico do sistema investigado, sendo o design experimental uma importante ferramenta para utilização em desenvolvimento de produtos e processos.

Por outro lado, a observação é parte integrante da compreensão do processo, porém, para entender o que acontece com a mudança de determinados fatores de entrada, deve-se fazer mais do que assistir, deve-se mudar os fatores na entrada e praticar a observação dos resultados na saída de modo a se entender os efeitos das respectivas alterações, ou seja, precisam ser realizados experimentos no sistema. A elaboração de teorias ou hipóteses sobre o que faz um sistema funcionar, só podem ser comprovadas com o uso de experimentos. Cada execução experimental é um teste, porém, pode-se definir um experimento como um teste ou uma série de execuções, nas quais mudanças propositadas são feitas nas variáveis de entrada de um processo com a devida observação em sua saída (MONTGOMERY, 2012).

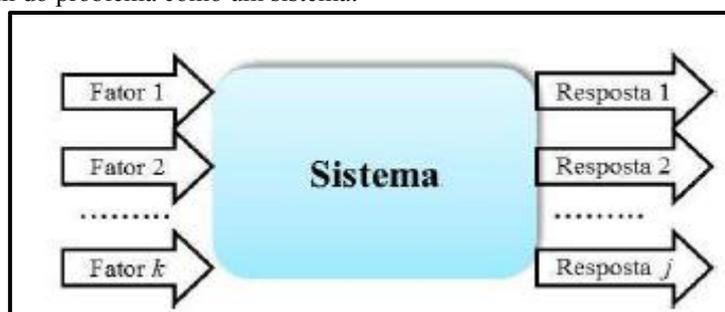
O que leva um pesquisador a fazer experimentos é o desejo de encontrar soluções para determinados problemas. Utilizando técnicas estatísticas apropriadas é possível resolver problemas experimentais de forma eficiente. Embora estatística seja um termo que não goza de alta popularidade entre engenheiros em geral, a análise de dados é apenas uma parte da estatística. A outra parte é planejar os experimentos que produzirão os dados. Muitos profissionais já descobriram de forma dolorosa que a falta de planejamento pode levar um experimento a resultados inúteis, dos quais nem a análise mais sofisticada consegue concluir algo. Usando planejamento de experimentos baseado em princípios estatísticos, os pesquisadores podem extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil. Um exemplo seria uma situação onde um químico tenha o conhecimento de que a temperatura e a condição de concentração de um determinado elemento químico podem afetar o rendimento do processo. Somente o conhecimento teórico, não gera dados para a definição dos melhores valores para a temperatura e concentração para maximizar o rendimento do processo. Uma abordagem estatística para planejamento de testes, pode ajudar a definir os melhores valores para os parâmetros de processo (BARROS NETO, 2007).

O Delineamento de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*) é uma ferramenta utilizada para investigar diferentes variáveis operacionais buscando trabalhar com um número reduzido de experimentos. Trata-se de um método estruturado e organizado, que determina o relacionamento dos fatores de entrada e saída de um processo, considerando a definição de conjunto de experimentos onde todos os fatores relevantes são variados sistematicamente (RODRIGUES, 2016).

2.2.1 Definição de Variáveis

O problema a ser abordado pode ser considerado como um sistema que atua como uma função desconhecida (motivo pelo qual deve-se fazer os experimentos), sujeito a variáveis de entrada, chamado de fatores F_k e variáveis de saída, as quais são chamadas de respostas R_j , conforme mostra a Figura 8. Pode-se afirmar que a resposta depende dos fatores e o sistema atua como uma função (desconhecida a princípio). O objetivo da realização dos experimentos é descobrir essa função. No planejamento de um experimento, define-se quais são os fatores e as respostas de interesse. Os fatores em geral, são as variáveis que o experimentador tem condições de controlar (BARROS NETO, 2007).

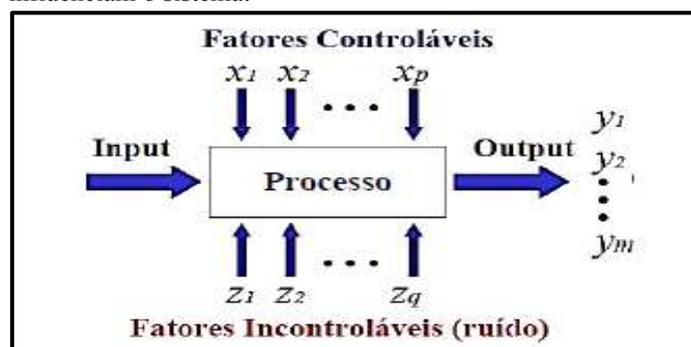
Figura 8 - Abordagem do problema como um sistema.



Fonte: BARROS NETO (2007).

As variáveis não controladas inerentes ao sistema que está em análise, devem ser consideradas. A Figura 9, mostra uma representação gráfica onde o *input* é a entrada oriunda de um processo anterior, o *output* (identificado como y) são as saídas do processo em análise, $X_1, X_2, e X_p$, são os fatores onde é possível o controle (variáveis de entrada) e $Z_1, Z_2 e Z_q$, são os fatores incontroláveis, ou seja, os ruídos inerentes ao processo que não serão controlados. (RODRIGUES, 2016).

Figura 9 – Fatores que influenciam o sistema.



Fonte: RODRIGUES (2016).

Segundo Montgomery, deve-se utilizar uma abordagem sistêmica sobre o problema, de modo a avaliar a magnitude das fontes de variação que influenciam um processo. Deve-se iniciar identificando e selecionando os fatores que possam contribuir para esta variação, utilizando técnicas como do diagrama de causa e efeito, com a participação de especialistas no processo. Após isso, de posse dos fatores escolhidos, planeja-se os experimentos para estimar seus efeitos, isto é, garantir que o estudo em questão seja viável. Ressalta-se que dados históricos podem ser utilizados para avaliar que sim o número de níveis em cada fator. Uma temperatura no mínimo da especificação de processo comparada com o máximo possível no processo, seria um exemplo de dois níveis para este fator. É importante providenciar a aleatorização do experimento para garantir que a variação dos fatores incontrolláveis seja diluída no arranjo proposto, diminuindo assim a possibilidade de incorreta interpretação de resultados. Os experimentos devem ser realizados conforme o planejado com a devida documentação e análise de qualquer anormalidade que vem a ocorrer durante sua condução (MONTGOMERY, 2012).

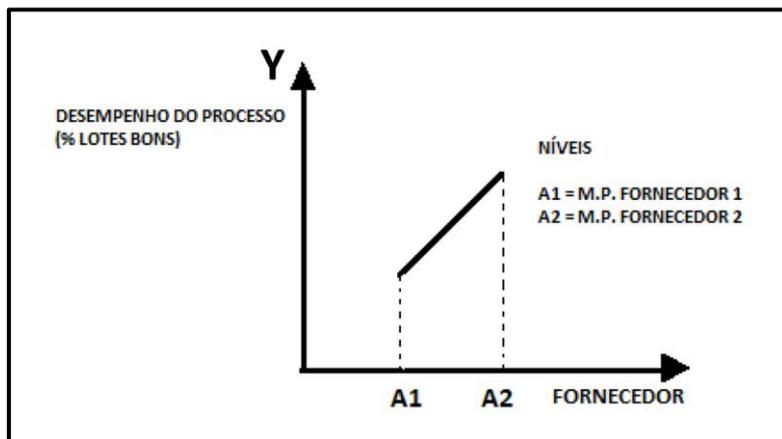
2.2.2 Tipos de Arranjos Experimentais

Segundo Montgomery, existem diversas maneiras de combinar os experimentos, uma vez que todos os fatores podem ser alterados simultaneamente. A ordem-padrão empregada nos arranjos DOE (*Design of Experiments*) geram condições experimentais balanceadas e ortogonais, de tal maneira que os fatores em análise sejam testados uniformemente em cada um de seus níveis. Dentre os arranjos possíveis, o mais comum é o fatorial completo onde geralmente trabalha-se com dois níveis. Neste caso, de acordo com a Equação 3, a quantidade de experimentos N é igual ao número de níveis experimentais (2) elevados ao número de fatores (K).

$$N = 2^K \quad (3)$$

A Figura 10 exemplifica um caso em que é verificado somente um fator (fornecedor - $K=1$) para avaliação de desempenho do processo experimentando dois níveis. Para ilustrar como um experimento fatorial é conduzido, supor que há somente dois fatores, sendo um deles o fornecedor e outro a máquina (MONTGOMERY, 2012; ACERVO PESSOAL, 2021).

Figura 10 - Experimento com um fator.

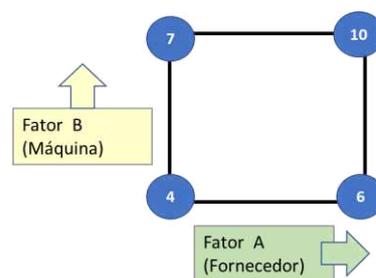


Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A Figura 11 mostra um experimento fatorial de dois fatores para estudar os seus efeitos conjuntos na quantidade de peças rejeitadas. Observa-se que este experimento tem ambos os fatores em dois níveis e que todas as possíveis combinações são utilizadas. Geometricamente os quatro resultados formam os cantos de um quadrado. Este tipo particular de experimento é denominado projeto fatorial 2^2 , ou seja, dois fatores, cada um em dois níveis (MONTGOMERY, 2012; ACERVO PESSOAL, 2021).

Figura 11 - Experimento com dois fatores.

QUANTIDADE REJEITADA EM 100 PRODUZIDAS (% nok)		FORNECEDOR		TOTAL
		A1	A2	
MÁQUINA	B1	4	6	10
	B2	7	10	17
TOTAL		11	16	27



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

Utilizando a ilustração da Figura 11 e as Equações 04, 05 e 06, pode-se calcular os efeitos dos fatores A e B, assim como a interação entre eles, ou seja, AB.

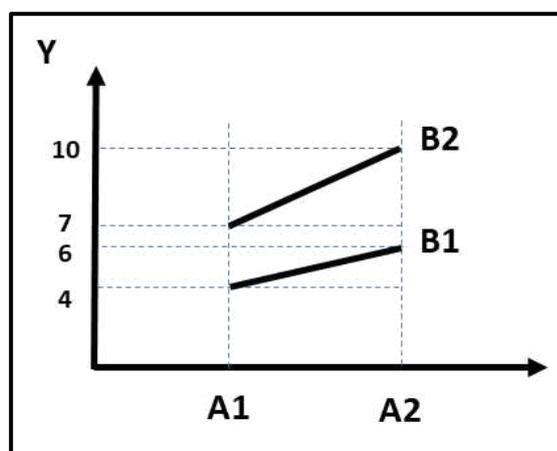
$$\text{Efeito } A = \frac{[(B1,A2) - (B1,A1)] + [(B2,A2) - (B2,A1)]}{2} \quad (4)$$

$$\text{Efeito } B = \frac{[(A1,B2) - (A1,B1)] + [(A2,B2) - (A2,B1)]}{2} \quad (5)$$

$$\text{Efeito Interação } AB = \frac{[(A2,B2) - (A2,B1)] + [(A1,B1) - (A1,B2)]}{2} \quad (6)$$

Assim, para o exemplo da Figura 11, o efeito correspondente ao fornecedor $A = \frac{(6-4)+(10-7)}{2}$ é igual a 2,5 peças rejeitadas, assim como o efeito da máquina $B = \frac{(7-4)+(10-6)}{2}$ é igual a 3,5 peças rejeitadas. Em alguns experimentos, pode-se descobrir que a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é o mesmo em todos os níveis dos outros fatores. Quando isso ocorre, há uma interação entre os fatores. O efeito da interação $AB = \frac{(10-6)+(4-7)}{2}$ é igual a 0,5 peças rejeitadas. Conclui-se então, que o efeito da máquina (B), é mais significativo que o do fornecedor (A), e o efeito da interação entre os dois é considerada como fraca. Assim como para arranjos de um fator, uma outra forma de apresentar os resultados é plotando os valores em um gráfico conforme demonstrado na Figura 12. Com o foco no exemplo da Figura 11, o valor de Y, corresponderá a quantidade rejeitada em 10 peças produzidas com fornecedor A2 processadas na máquina B2 (MONTGOMERY, 2012; ACERVO PESSOAL, 2021).

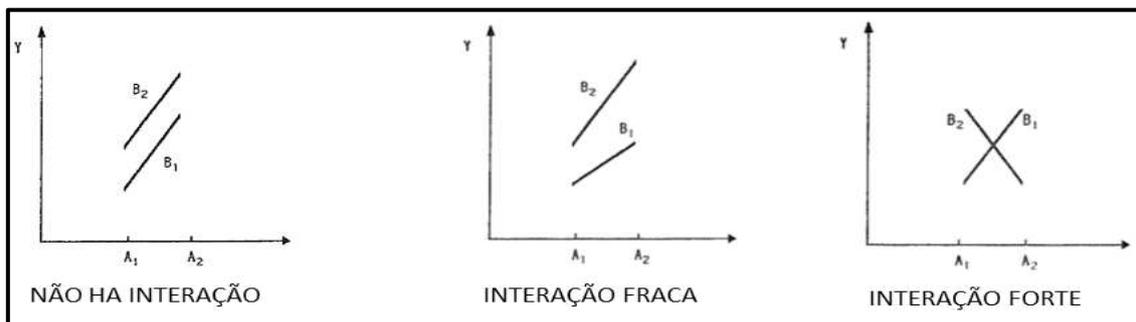
Figura 12 – Experimento com dois fatores - representação gráfica.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A interação entre os fatores é um dado de importância no experimento. Existem situações em que um fator associado ao outro é mais significativo do que o próprio fator. O exemplo da Figura 12, trata de um experimento onde a interação entre os fatores máquina e fornecedor é fraca. No sentido de ilustrar a intensidade da interação entre fatores, a Figura 13 demonstra graficamente as três situações possíveis. (MONTGOMERY, 2012; ACERVO PESSOAL, 2021).

Figura 13 – Interação entre fatores.



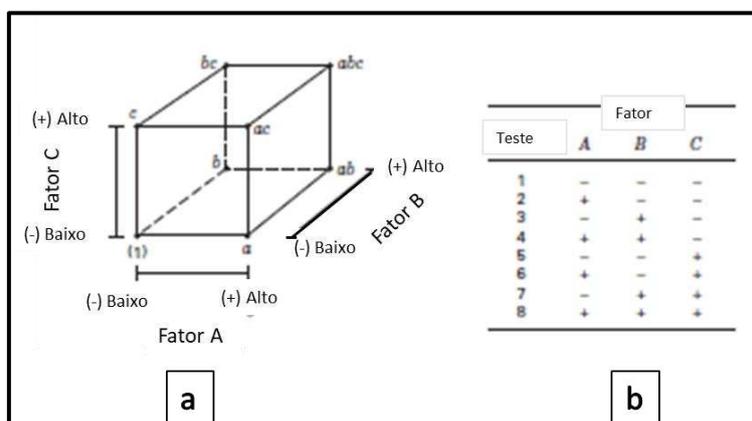
Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

Os arranjos fatoriais completos podem ser gerados para qualquer quantidade de fatores. Os níveis de cada fator são identificados pelo sinal positivo (+) e negativo (-). Esses níveis podem ser quantitativos, como dois valores de temperatura, pressão ou tempo; ou qualitativos, como duas máquinas, dois operadores, com a definição de níveis alto e baixo de um fator. Os níveis se alteram nas colunas segundo uma lei de formação onde na primeira coluna, os níveis se alteram a cada experimento ou seja, 2^0 ; para a segunda coluna, os níveis se alteram a cada dois experimentos ou seja, 2^1 ; para a terceira coluna, a cada 2^2 e assim por diante. Este ciclo se repete para tantas colunas quanto forem os k fatores, até a k-ésima coluna. Fatoriais completos cobrem todo o espaço experimental; porém, enquanto o número de fatores cresce linearmente, o número de experimentos cresce exponencialmente. Assim sendo, uma quantidade muito grande de fatores pode tornar um processo de experimentação inviável (RODRIGUES, 2016).

Em um experimento com fatorial design de 2^3 , suponha que três fatores, A, B e C, cada um em dois níveis, sejam de interesse. O experimento gera então, as oito combinações de tratamento que podem ser exibidas geometricamente como um cubo, conforme mostrado na Figura 14(a). Usando a codificação ortogonal (+) e (-) para representar os níveis baixo (-) e alto (+) dos fatores, pode-se listar as oito execuções no projeto 2^3 como na Figura 14(a e b). A

forma de denominação na Figura 14(b) é matriz de design onde escreve-se a quantidade de experimentos com seus respectivos níveis na ordem padrão, como A, B e C que geram as combinações AB, AC, BC e ABC (MONTGOMERY, 2012).

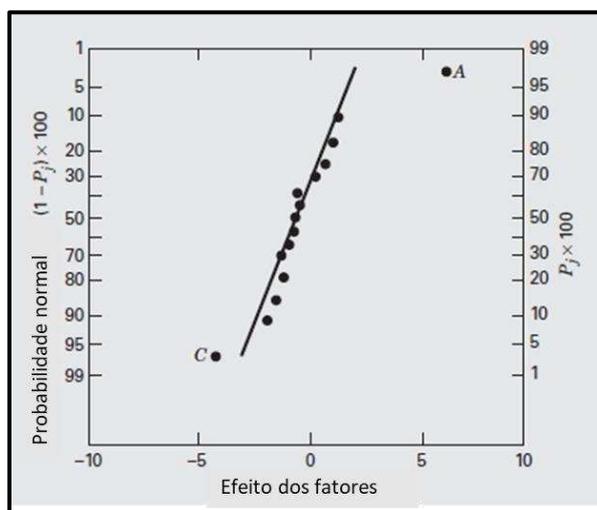
Figura 14 – Experimento com fatorial design de 2^3 .



Fonte: MONTGOMERY (2012).

De modo análogo ao experimento com dois fatores, pode-se avaliar graficamente as interações. Para análise dos efeitos utiliza-se um gráfico de probabilidade normal, conforme demonstrado na Figura 15, onde os pontos que não estão sobre a reta (pontos A e C) são considerados fatores significativos (MONTGOMERY, 2012). Em função do aumento da complexidade dos cálculos em experimentos com número superior de fatores, sugere-se o uso de software estatístico como por exemplo, o Minitab (PRÓPRIO AUTOR, 2021).

Figura 15 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos.



Fonte: MONTGOMERY (2012).

2.3 Processo Metalurgia do Pó

Para buscar um melhor aproveitamento da matéria prima e com a utilização de menos energia, a metalurgia do pó se destaca na fabricação de peças com boa resistência mecânica associada a uma menor densidade quando comparadas com peças produzidas pelo processo de fundição. (DO SANTOS, 2009). Dentre os motivos para utilização da Metalurgia do pó, pode-se citar (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009):

- Apresenta um aproveitamento de matéria prima acima de 95%, o que reflete no custo de fabricação, e isso torna o produto economicamente vantajoso frente aos obtidos pelos processos de fundição, extrusão à quente /frio, forjamento e usinagem. A Figura 16 demonstra de modo esquemático as vantagens ambientais proporcionadas pela metalurgia do pó levando em conta o uso da matéria prima e o consumo de energia por quilo processado.
- Processo não poluente.
- Propriedades mecânicas de acordo com a aplicação.
- Permite fabricação de altos volumes.
- Permite a fabricação de peças complexas.
- Ótimas tolerâncias dimensionais.
- Ótimo acabamento superficial.

Figura 16 – Comparação entre processos.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

A metalurgia do pó é empregada na fabricação de várias peças metálicas ferrosas e não ferrosas com aplicação na indústria. O maior usuário é a indústria automotiva e de motocicletas (aproximadamente 75% do total). A Figura 17 apresenta exemplos de peças metálicas

fabricadas pelo processo de metalurgia do pó em um automóvel. Alguns pós metálicos, são aplicados em outros setores como eletrodomésticos que utilizam buchas autolubrificantes; compressores onde encontramos pistões e bielas; ferramentas elétricas com uso de mancais e flanges. Setores como de ferramentas de corte e usinagem, equipamentos agrícolas, equipamentos médicos e odontológico e equipamentos de laser, são parte dos usuários de produtos da metalurgia do pó. Encontra-se também, aplicações em cerâmica, filtros metálicos, refratários, materiais de contatos elétricos e magnéticos. O Brasil apresenta um enorme potencial de crescimento quando comparado ao consumo médio de sinterizado por automóvel produzido em outros países. O peso médio de peças sinterizadas por veículo de na América do Norte no ano de 2008, girava em torno de 19,5 Kg enquanto no Brasil, no mesmo período, trabalha-se com 5,1 kg (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

Figura 17 – Aplicação da Metalurgia do pó em Automóveis.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

2.3.1 Histórico

A história de metalurgia do pó inicia em 3000 a.C. onde os egípcios já usavam esponja de ferro para fabricação de ferramentas. Os Incas já utilizavam a metalurgia do pó em uma técnica baseada na cementação de grãos de platina (similar à que se usa atualmente, na cementação de carbetos sinterizados). Por vários séculos, a técnica foi abandonada sendo retomada novamente na Europa no final do século XVIII, com a produção de liga platina-arsênio (BARBOSA, 1999). No século XIX, um método foi inventado para fazer platina compacta por sinterização de esponja de platina. A primeira aplicação comercial da metalurgia do pó, ocorreu quando foi utilizado carbono, e mais tarde ósmio, vanádio e tungstênio em filamentos de lâmpadas incandescentes (1878-1900). Outra área que recebeu atenção, foi o desenvolvimento de metais porosos com o a produção de filtros metálicos (ROLL, 1984).

Do ponto de vista industrial, a metalurgia do pó é considerada uma técnica nova e as primeiras notícias oficiais sobre sua utilização surgiram no início do século XIX, onde eram fabricadas peças a partir de metais com alto ponto de fusão. Pelo fato de na época não existir meios capazes de atingir temperaturas altas para conformação de metais de alto ponto de fusão, a metalurgia do pó atuou de forma a resolver esta dificuldade. Importantes desenvolvimentos na aplicação desta técnica só se deram no início do século XX, onde foi possível processar metais refratários como molibdênio e tungstênio por sinterização (REIS, 2018).

A partir de 1920, foram desenvolvidos os compósitos conhecidos como metal duro que combinam o cobalto com WC, WC-TiC ou W-TiC-TaC indispensáveis no desenvolvimento da indústria mecânica e os materiais usados em contatos elétricos que compreendem os sistemas Ag-Ni, Ag-SnO₂, Ag-CdO, W-Ag. Neste mesmo período, uma nova família de produtos começou a revolucionar e impulsionar a metalurgia do pó: os mancais autolubrificantes conhecidos com buchas. Após a Segunda Guerra Mundial, houve uma grande expansão com novos processos de fabricação como a compactação isostática. A partir da década de 1960, a metalurgia do pó passou a apresentar um grande crescimento com inovações nos pós utilizados, mais compressíveis e com novas ligas e aços rápidos sinterizados com desempenho superior aos convencionais (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

A Tabela 3, descreve o desenvolvimento histórico da metalurgia do pó e país/região de origem.

Tabela. 3 – Desenvolvimento Histórico da Metalurgia do pó

DATA	DESENVOLVIMENTO	ORIGEM
3000 a. C.	Esponja de ferro para fabricação de ferramenta	Egito e Índia
1200 d. C.	Cementação de grãos de platina	América do Sul (Incas)
1781	Liga platina-arsênio	Alemanha/França
1790	Produção comercial de recipientes para produtos químicos	França
1822	Lingotamento a partir do pó de platina	França
1826	Pó de platina compactado e sinterizado a altas temperaturas	Rússia
1829	Método Wollatson para produção de platina compacta a partir de esponja de platina	Inglaterra
1830	Sinterização de vários metais compactados	Europa
1859	Processo de fusão de platina	Europa
1870	Patente para mancais feitos de metais porosos (auto lubrificantes)	Estados Unidos
1878-1900	Filamentos para lâmpadas incandescentes	Estados Unidos
1915-1930	Carboneto duro sinterizado	Alemanha
Início de 1900	Compósitos metálicos, filtros metálicos e metais porosos	Estados Unidos
Anos 20	Mancais auto lubrificantes	Estados Unidos
Anos 40	Tecnologia do pó de ferro	Europa Central
Anos 50 e 60	Metalurgia do pó de materiais forjados	Estados Unidos
1980	Solidificação rápida e “moldagem por injeção”	Estados Unidos

Fonte: ROLL (1984)

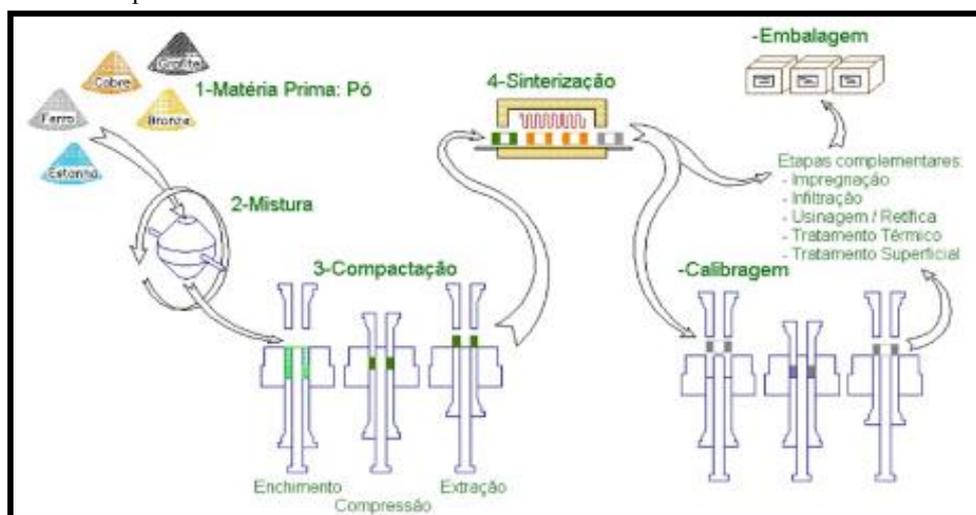
2.3.2 Processo da metalurgia do pó

O processo da metalurgia do pó é dividido em várias etapas desde a confecção do pó até o produto acabado. A compactação consiste em comprimir o pó metálico, geralmente um pó de aço, para obter um compacto de forma definitiva. Este compacto, cuja forma é mantida apenas pela coesão do pó, é então passado através de um forno a uma temperatura de sinterização abaixo da temperatura de fusão, mas suficiente para unir quimicamente as partículas do pó (GUEYDAN, 2000).

A Figura 18 descreve esquematicamente o fluxo de processos e as principais operações do processo da metalurgia do pó em diversas etapas. O processo se inicia com a matéria prima (1) na forma de pó metálico com granulometria controlada sendo o tamanho médio das partículas de 50 micrometros, na sequência há o processo de mistura (2) onde os componentes são misturados em misturadores especiais de modo a obter uma mistura homogeneia a ser utilizada na próxima etapa, denominada compactação (3) que consiste em prensar o pó da mistura em prensas com capacidade de acordo com as dimensões e peso do produto. Nesta condição, a forma é mantida apenas pela coesão do pó e o produto é frágil sendo possível quebrar o mesmo com baixo esforço mecânico. Em seguida, ocorre o processo de sinterização (4) que consiste em aquecer o produto a uma temperatura de 1.000° C à 1.150°C de modo a promover uma ligação química entre as particuladas compactadas e gerar o aumento da resistência do produto. Nesta condição o produto se comporta de modo similar às peças de aço comum.

De acordo com a aplicação do produto, existem situações em que etapas complementares após a sinterização, são requeridas. A próxima etapa, é a calibragem na qual o produto é submetido prensas para adequação dimensional. Nesta etapa, na maioria dos casos, o produto já adquire sua forma final. Existem situações onde a calibragem não é o suficiente para chegar à forma final do produto. Como exemplo, uma usinagem / retifica pode ser necessária para garantir tolerâncias mais restritas onde somente a calibragem não consegue garantir a capacidade da dimensão. As etapas complementares após a sinterização, ocorrem de acordo com os requisitos do cliente. A última etapa, é a embalagem do produto (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

Figura 18 – Fluxo de processo.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

2.3.3 Matéria Prima

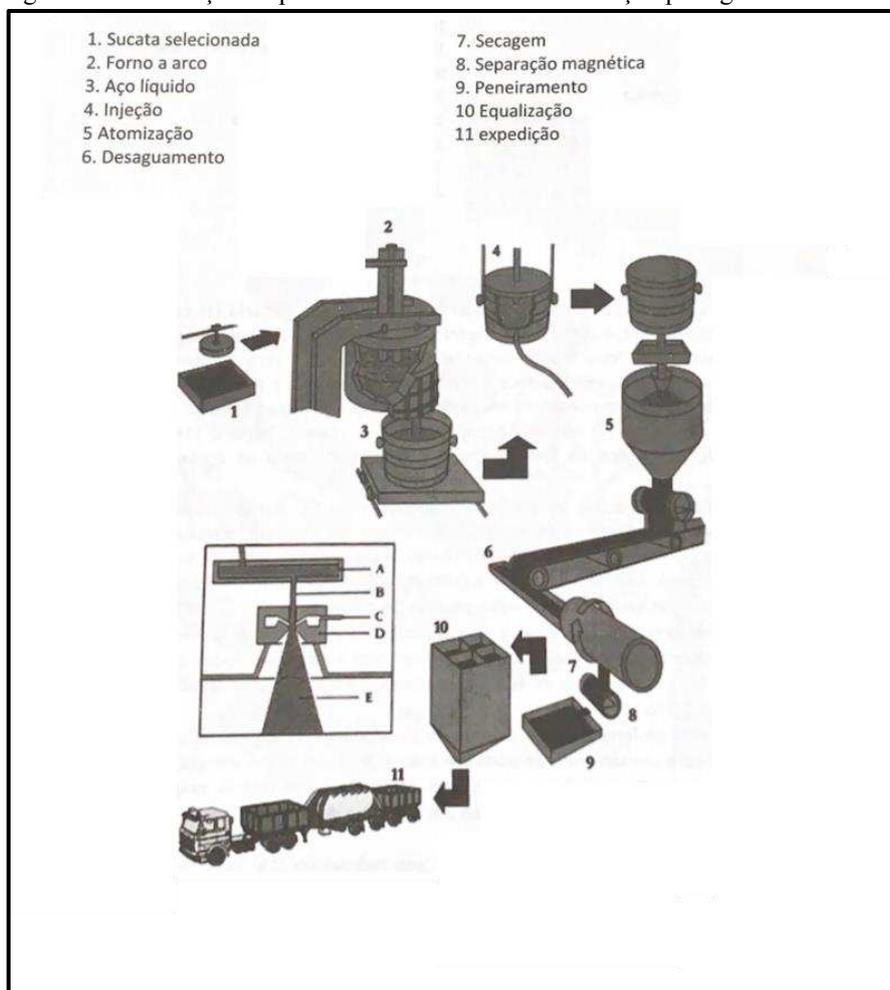
Os materiais utilizados para fabricação de produtos sinterizados podem ser ferrosos ou não ferrosos. As misturas de pó comumente encontradas no mercado, baseiam-se em três tipos diferentes de pós metálicos. Quando os elementos de liga são adicionados aos pós básicos sem ligação metalúrgica entre os componentes, denomina-se pós elementares. Quando existe uma conexão parcial entre os elementos de liga e os pós base, sua denominação é pré-difundido. No caso onde os elementos de liga são fundidos junto com o metal base, ou seja, na fase líquida todos os componentes já estão devidamente dissolvidos e após solidificação, cada partícula de pó tem a mesma composição nominal, são chamados de pré-ligados.

Os principais processos de fabricação de pós metálicos, que correspondem a 90% da aplicação atual são: redução direta do minério de ferro por carbono, atomização de aço baixo-carbono por água e granulação de ferro fundido por água seguido de moagem. Outros processos como a atomização a gás, eletrolítico, carbonila e redução de carepa também podem ser considerados (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009). O processo de atomização, consiste essencialmente em pulverizar um líquido metálico em partículas finas, geralmente com tamanho inferior a 150 μm . Essa pulverização é feita forçando-se a passagem de uma corrente de metal líquido através de um pequeno orifício, na saída do qual a corrente metálica líquida é desintegrada por um jato de água, ar ou gás. O metal solidifica imediatamente pela ação combinada do jato e do resfriamento natural causado pela expansão do metal ao deixar o orifício. Mediante um sistema de sucção, o pó é recolhido numa câmara (CALICCHIO, 2009).

A Figura 19 ilustra o processo de obtenção da matéria prima oriunda do processo de atomização de aço baixo carbono por água. A sucata de aço (1) é carregada em forno elétrico a arco (2) onde é fundida. Nesta fase, é possível a adição de elementos de liga. O metal líquido (3) é vazado em panela de transferência (4) e segue para o processo de atomização (5). Na etapa (5), o metal líquido sai da panela para o distribuidor (A) e deste, através de um filete (B) encontra jatos de água de alta pressão (C). O filete de metal líquido então explode em finas partículas (E) que são oxidadas superficialmente pela presença de ar e vapor do sistema. É formado então, uma lama contendo água e pó de ferro que é desaguada (6) e seca (7), com concentração magnética na sequência (8), peneiramento (9), homogeneização (10), e transferência para expedição (11), na qual será levado para tratamento sob atmosfera de hidrogênio e com aquecimento, onde ocorre o recozimento da estrutura e redução do conteúdo de carbono e oxigênio para níveis adequados a utilização. O pó fabricado apresenta boa

compresividade e alta resistência a verde (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

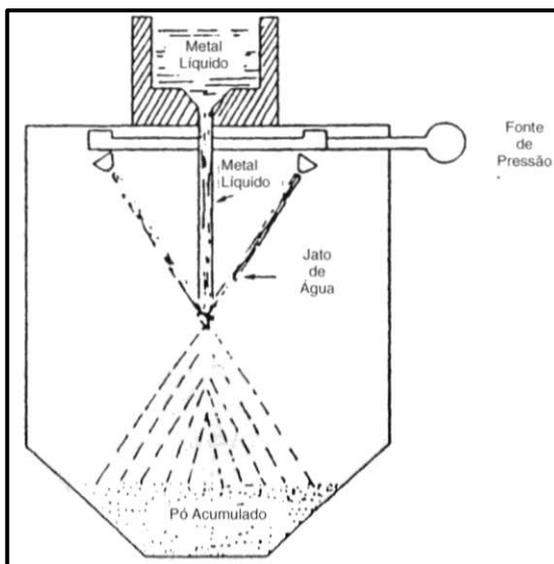
Figura 19 – Fluxograma de fabricação de pó de ferro Processo de atomização por água.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

O detalhamento do principal ponto do processamento de processo de atomização por água, verificado na Figura 19 (item 5), é demonstrado na Figura 20 com o funcionamento deste processo de modo esquemático, (CHIAVERINI, 2001). Observa-se um reservatório de metal líquido, esquematizado em uma panela atuando com uma válvula localizada em sua parte inferior que garante um fluxo contínuo, uniforme e controlado. Este fluxo metálico é atingido pelo meio desintegrador por meio de um sistema de válvulas de atomização e é desintegrado, formando-se, em consequência de alta velocidade do meio atomizante, pequenas gotas de metal, as quais se resfriam rapidamente, de modo a se solidificar e ser depositada no fundo da câmara de atomização. Essa câmara pode eventualmente ser protegida com um gás inerte, com a função de reduzir ou impedir a oxidação do pó (KLAR, 1984).

Figura 20 – Representação esquemática do processo de atomização em água .

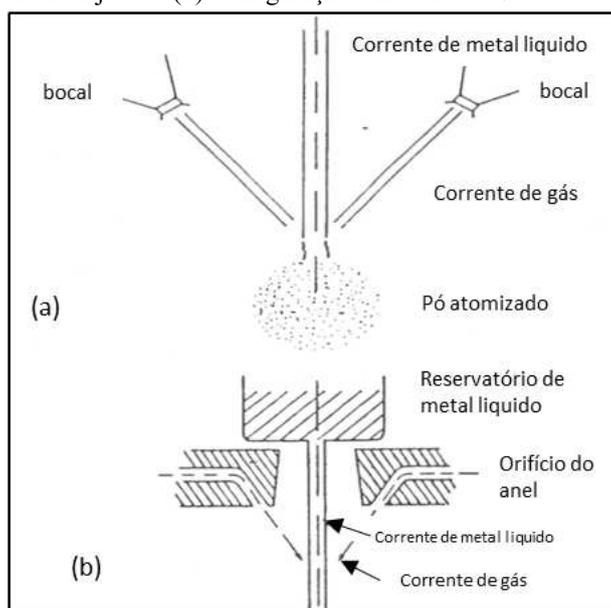


Fonte: CHIAVERINI (2001).

Outro processo é a atomização a gás que utiliza como elemento desintegrador do metal líquido, uma substância gasosa pressurizada como por exemplo, nitrogênio, argônio, ar, hélio entre outros. A Figura 21 mostra as duas configurações possíveis do processo de atomização a gás. A velocidade do gás depende da forma do bocal e atomização e pode variar de 20 m/s a velocidades supersônicas. A estrutura dos pós obtidos neste tipo de atomização, (assim como em água) pode variar entre amorfa, cristalina fina e dendrítica (KLAR, 1984).

Figura 21 - Representação esquemática do processo de atomização a gás:

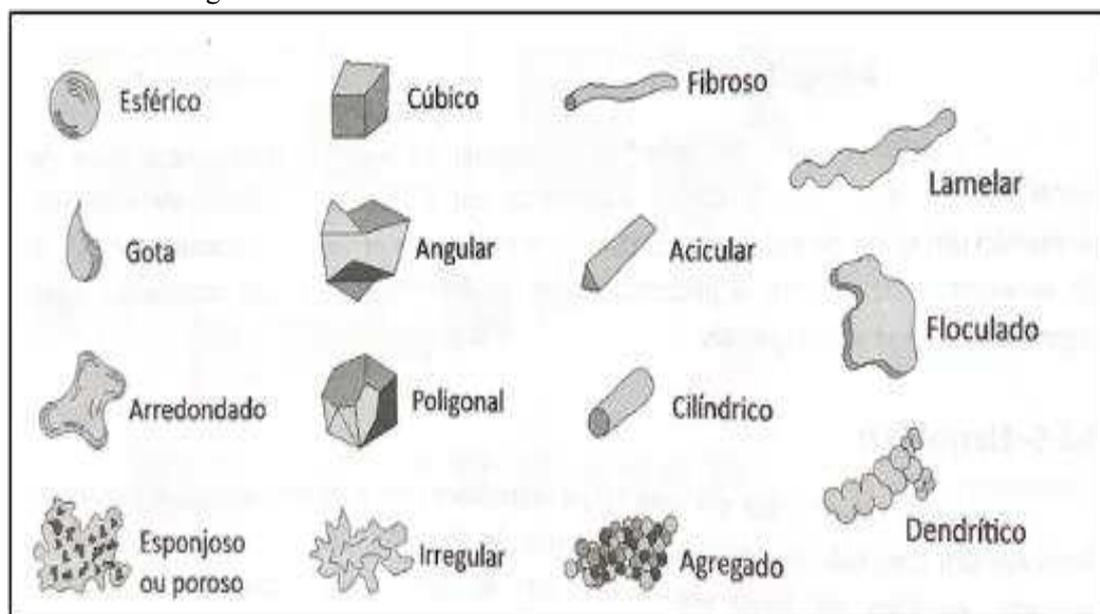
(a) configuração de dois jatos e (b) configuração “anel anular”.



Fonte: CHIAVERINI (2001).

As morfologias dos pós de ferro estão relacionadas ao processo de fabricação e são resumidas na Figura 22. A resistência a verde, relacionada com o formato geométrico do pó, é uma característica associada a possibilidade de evitar trincas no componente durante a ejeção do mesmo da matriz de compactação. Partículas irregulares como regra geral, apresentam maior resistência a verde que pós com partícula mais arredondada. Outra característica associada ao formato geométrico da partícula, é a escoabilidade. Esta propriedade mecânica influencia diretamente a produtividade dos equipamentos de compactação. Pós com geometria regular escoam melhor do que pós com geometria irregular (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009). A porosidade das partículas metálicas está relacionada com a compressibilidade. A compressibilidade é uma expressão utilizada para quantificar a densificação que uma massa de pó pode sofrer sob aplicação de pressão (CALICCHIO, 2009).

Figura 22 – Morfologia de Pós.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

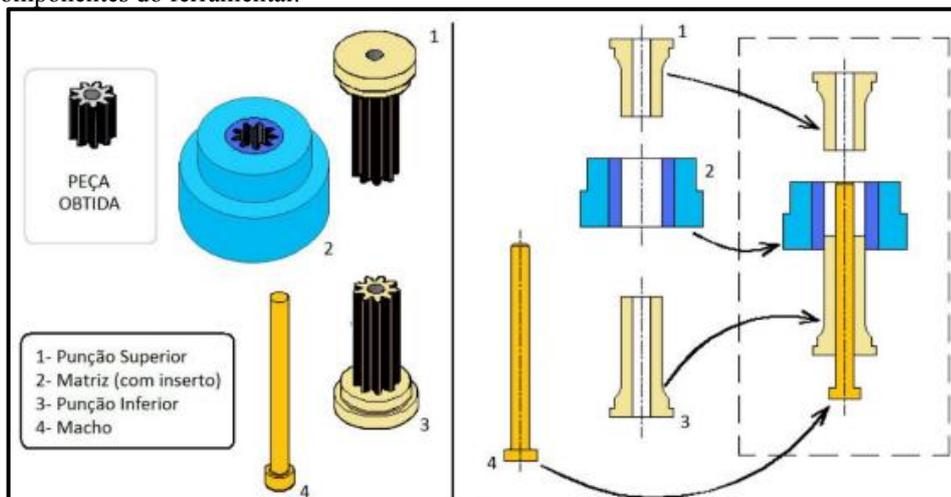
A principal característica que diferencia o pó atomizado de outros métodos, é o seu formato e densidade. Pode-se afirmar que estes pós são livres de porosidade interna e relativamente compactos, com alta densidade e baixa área de superfície quando comparados a outros tipos de pós. Isto implica diretamente em boa escoabilidade e boa compressibilidade. Os formatos de pós atomizados em água são muitas vezes atribuídos a taxas de resfriamento das gotículas de metal líquido e podem ser esferoidais, angular, irregular dendrítico, esponja, cúbico, poligonal, etc. (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009). Para o processo de compactação, o uso de partículas esféricas é mais favorável, porém, deve-se levar

em conta que formas irregulares apresentam uma melhor sinterização em função de uma maior área superficial da partícula em relação ao seu volume gerando uma melhor interação entre as partículas quando aquecidas em forno. A morfologia é influenciada diretamente pela distribuição granulométrica dos pós metálicos. O método normalmente utilizado para analisar o formato da partícula é a microscopia óptica (CALICCHIO, 2009).

2.3.4 Compactação

A etapa de compactação consiste em aplicar pressão sobre o pó, para consolidar o mesmo no formato desejado. Trata-se da primeira operação de consolidação da metalurgia do pó cujo objetivo é conformar o pó na forma projetada, conferindo as dimensões projetadas e obter a densidade do verde e resistência mecânica necessária para o processo posterior. O fator mais importante é de proporcionar o necessário contato entre as partículas de pó, para garantir a eficiência da operação de sinterização. A compactação é executada em prensas mecânicas ou hidráulicas (BARBOZA, 2009). O processo de compactação envolve o rearranjo e deformação das partículas, produzindo desta forma, ligações físicas entre elas. Para aumentar a eficiência de compactação, o pó deve passar por um processo de condicionamento onde são utilizados lubrificantes e aglomerantes. Os lubrificantes têm função de minimizar o atrito entre as partículas do pó e a parede da matriz, facilitando a ejeção do compactado. Os aglomerantes são compostos orgânicos que melhoram as propriedades de empacotamento e facilitam o manuseio da peça (BARBOSA, 1999). Uma maneira para conformar o pó por um método conhecido como compactação uniaxial consiste na utilização de ferramental rígido movimentado por uma prensa onde a matéria prima é alimentada na ferramenta na operação de enchimento, seguida pela compactação, extração e remoção da peça formada. A Figura 23 mostra esquematicamente o ferramental de compactação que é composto pela matriz, punção superior e punção inferior. Quando se deseja que a peça final possua um furo, é empregado o componente denominado Macho (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

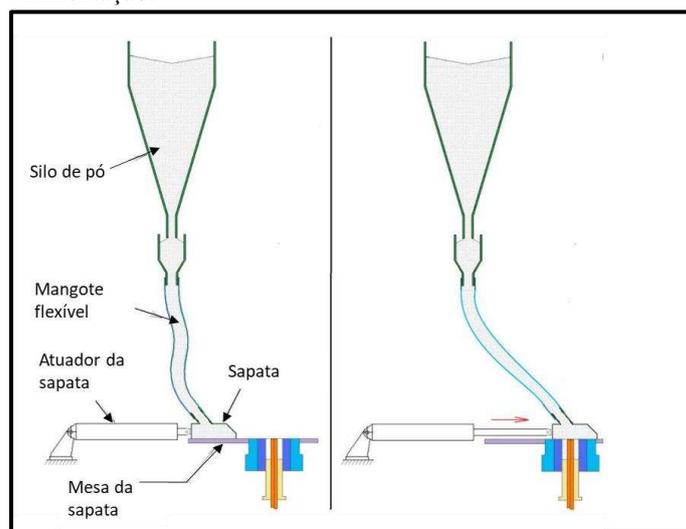
Figura 23 – Componentes do ferramental.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

O ciclo de compactação uniaxial consiste em quatro movimentos denominados enchimento, compactação, extração e remoção. A etapa de alimentação pó no ferramental, é chamada de “Enchimento” onde a matéria prima é armazenada em um silo. Esta escoa por meio de um mangote flexível até a sapata de alimentação. A sapata que possui o fundo aberto, desliza sobre uma superfície plana e leva o pó até a cavidade do ferramental onde o material é depositado por gravidade ou sucção. O enchimento é finalizado quando a sapata retorna a sua posição inicial deixando o pó nivelado com a matriz. A Figura 24 ilustra o funcionamento do sistema de alimentação para enchimento.

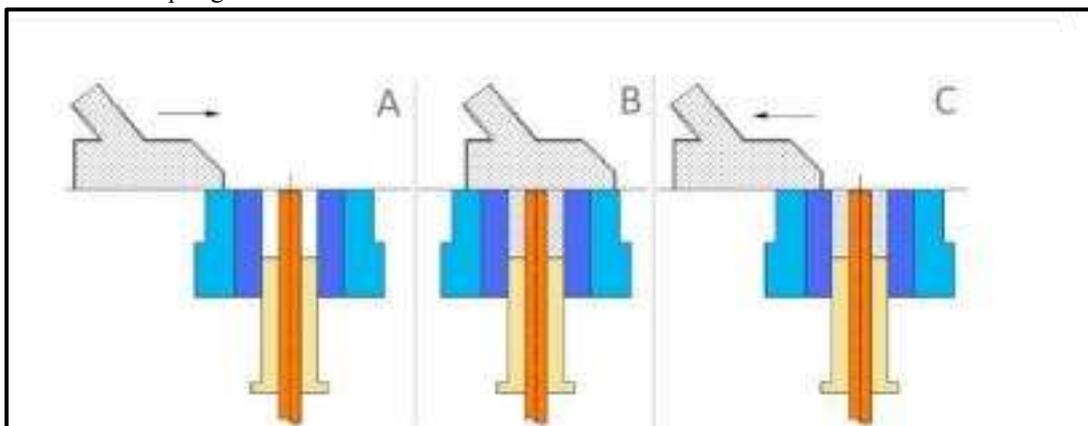
Figura 24 – Sistema de Alimentação.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

A etapa de enchimento, detalhada na Figura 25, deve levar em conta a segregação do material, velocidade e vibração da sapata. A segregação, está relacionada com a movimentação do pó e ação de vibrações. A influência da velocidade, está relacionada o risco de o tempo de permanência sobre a sapata não ser o suficiente para o preenchimento total da matriz, gerando variações na densidade da peça compactada geradora de distorções dimensionais e variação de dureza após a sinterização. O recurso da vibração da sapata é representado por movimentos e avanço e retorno rápidos e curtos que podem ser aplicados quando a sapata se encontra sobre a cavidade do ferramental ajudando assim o enchimento em ferramentas de cavidade estreita (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

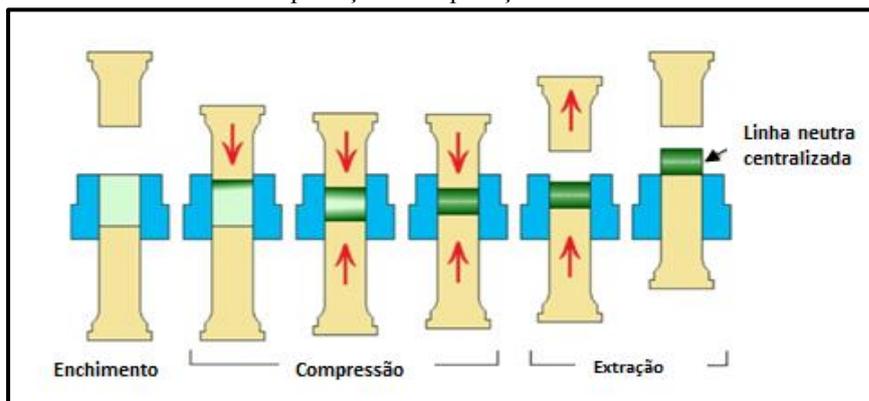
Figura 25 –Enchimento por gravidade.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

Para a etapa de compactação (ou compressão), o método mais empregado é a compactação em matriz, representado pela técnica de compactação de duplo efeito ou dupla ação, mostrado na Figura 26. Em função do pó ser um material de compressibilidade e escoabilidade limitadas e também devido o atrito com o ferramental durante a compactação, ocorre uma variação de densidade ao longo da altura da peça. A região de menor densidade, é chamada de linha neutra. Em peças com uma maior altura ou com mais de um nível (como por exemplo peças com flanges), pode ocorrer um efeito chamado de deslocamento da linha neutra. A técnica de compactação de duplo efeito onde o pó é pressionado com forças a partir de duas direções, produz peças com densidade mais uniforme. Este tipo de movimento, gera a linha neutra centralizada (BARBOZA, 2009).

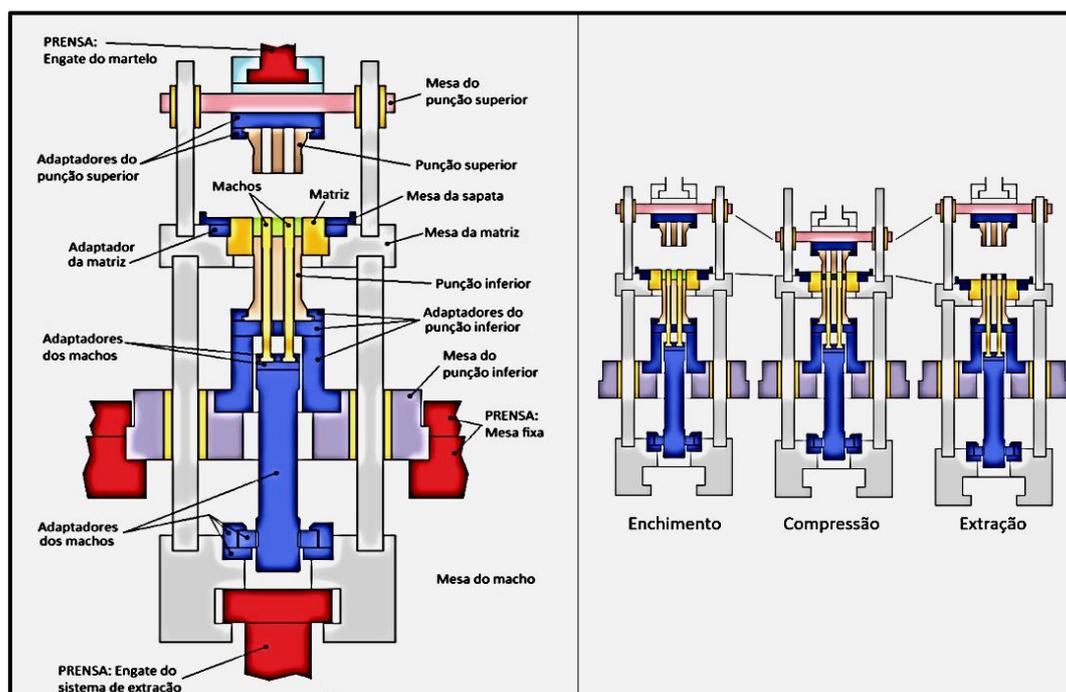
Figura 26 – Sequência de movimentos na compactação de dupla ação.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

O movimento de extração também chamado de ejeção, é a etapa de retirar a peça de dentro do ferramental. Esta etapa é crítica pois se realizada incorretamente pode gerar trincas no material compactado. Nesta etapa do processo, a peça compactada recebe o nome de peça verde. O movimento de extração pode ser realizado conforme mostrado na Figura 26 ou pelo sistema de retração mais conhecido pelo termo em inglês *withdrawal* onde a extração não é realizada pela elevação da punção inferior, mas sim pela retração da matriz. A Figura 27, mostra o ferramental montado nos componentes da prensa de compactação e os processos de enchimento, compressão e extração por *withdrawal* (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

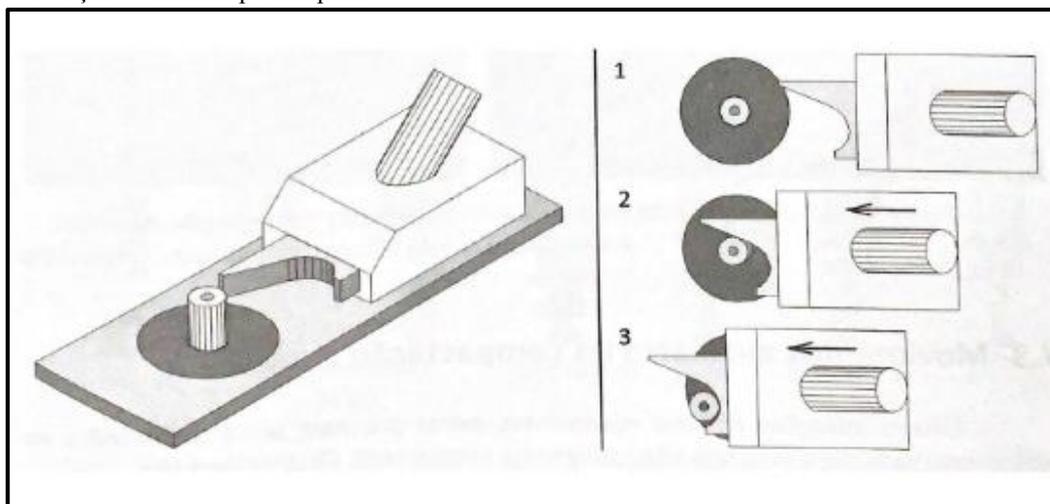
Figura 27 – Montagem dos componentes do ferramental e seus movimentos.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

A última etapa é a remoção que ocorre logo após o término da extração. Esta remoção pode ser executada por um manipulador, que deve ter seus movimentos sincronizados com os da prensa. Este dispositivo é conhecido por *pick up*, utilizado nos casos em que a peça possui detalhes em seu diâmetro externo que exigem um grande cuidado como por exemplo, em engrenagem. O método mais comum utilizado na remoção, é a utilização da própria sapata de enchimento que consiste em retirar a peça verde do local de compactação, antes que a sapata inicie o próximo processo de enchimento da cavidade neste caso, aproveita-se o movimento da ida da sapata. É importante que este movimento seja auxiliado de um desviador na parte frontal da sapata. A Figura 28 mostra uma vista em perspectiva da sapata com um desviador na sua parte frontal, onde à direita da Figura está descrita a vista superior da sequência do movimento de remoção da peça (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

Figura 28 – Remoção Executada pela Sapata.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

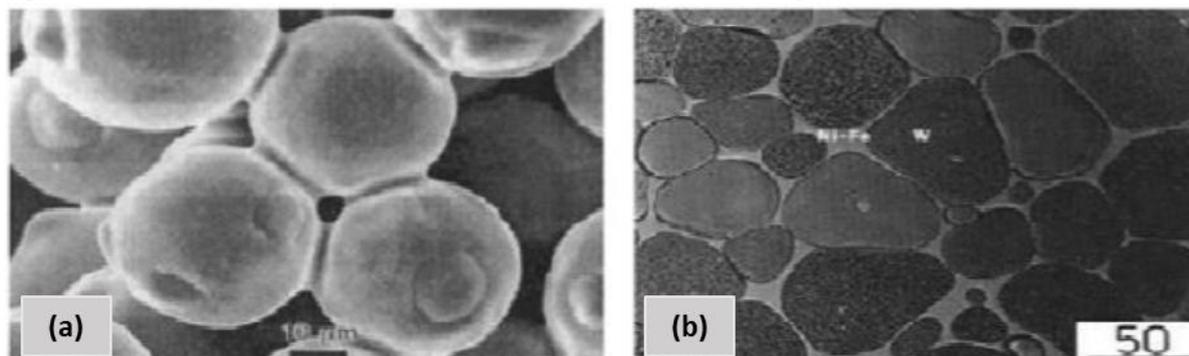
2.3.5 Sinterização

A etapa posterior a compactação é a sinterização. Esta é a operação que constitui a fase final do ciclo de consolidação dos pós metálicos. Segundo Barboza, a sinterização consiste no aquecimento do compactado verde a temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão do metal ou do principal constituinte da liga metálica considerada. Esta etapa é submetida a controles relacionados a tempo, temperatura e atmosfera do forno. Como resultado, as partículas que constituem o compactado ligam-se quimicamente entre si e o material adquire as características desejadas de densidade, dureza e resistência mecânica (BARBOZA, 2009). Davis define a sinterização como um dos fenômenos mais complexos no processamento da

metalurgia do pó. Durante a sinterização, as ligações químicas são desenvolvidas a partir dos intertravamentos mecânicos entre as partículas de metal em pó no compactado (DAVIS, 1998). Segundo o grupo setorial de metalurgia do pó, a sinterização é definida como o processo pelo qual agregados de pós compactados ou não, são transformados em corpos sólidos por mecanismos de transporte atômico difusionais a temperaturas abaixo do ponto de fusão do constituinte principal (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009).

No processo de sinterização para formação do aço, ocorre a redução do óxido de ferro e reação do carbono misturado no pó de grafite, gerando o acréscimo do nível de carbono final, obtido pela difusão deste carbono. O grau de densificação, depende dos parâmetros de sinterização e dos materiais envolvidos. Geralmente, temperaturas de sinterização mais altas e tempos mais longos, promovem uma maior densificação das peças sinterizadas (DAVIS, 1998). A sinterização pode acontecer em fase líquida ou sólida, quando em fase sólida (Figura 29 (a)) predomina a aproximação das partículas e seu rearranjo em uma estrutura mais compactada. Primeiramente ocorre a geração dos pescoços (*necks*) em função da ligação química entre partículas sólidas. Posteriormente, após atingir 80% da densidade final, na qual não é possível diferenciar partículas individualmente, há a formação de poros devido a união tripla entre os grãos adjacentes, então a contração acontece de forma acelerada e os grãos crescem vagarosamente; por fim, com a obtenção de 91 a 95% de densidade, tem-se a formação de poros isolados pelo fechamento dos canais dos poros. A sinterização por fase líquida (Figura 29 (b)), ocorre com materiais com ponto de fusão diferentes de modo que com o aumento da temperatura, o material de menor ponto de fusão, dissolve e envolve as partículas do material que não fundiu, realizando a conexão entre elas (LIMA, 2018).

Figura 29 – Ilustração de sinterização: (a) Por fase sólida e (b) Por fase líquida.



Fonte: DAVIS (1998).

A maioria das peças ferrosas é sinterizada em fornos de esteira de malha entre 1.105 à 1.120°C. As atmosferas de forno comuns empregadas incluem amônia dissociada (75 % vol

H₂, 25 % vol N₂), gás endotérmico (40 % vol N₂, 40 % vol H₂, 20 % vol CO, com pequenas quantidades de água, dióxido de carbono e metano) e atmosferas à base de nitrogênio (por exemplo, nitrogênio e amônia dissociada a 10%). (DAVIS, 1998) Por outro lado, a operação pode ser realizada em fornos contínuos com a zona de pré aquecimento entre 500 e 800°C, a qual permite o aquecimento gradual da carga e remove o lubrificante oriundo da compactação, seguida da zona de sinterização onde a temperatura de sinterização para ferro e aço, ocorre em até 1.150°C com atmosfera controlada, seguida da zona de resfriamento (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

2.3.6 – Etapas complementares

Embora a metalurgia do pó seja tratada como um processo *net shape* ou *near net shape* (próximo a forma final), de acordo com os requisitos do cliente, algumas aplicações requerem características somente atingidas com etapas complementares. A necessidade destas operações pode ser justificada em situações onde a tolerância dimensional é estreita, alta dureza ou resistência mecânica, estanqueidade a gases ou líquidos, resistência a corrosão e aparência. Uma destas operações é a calibragem que consiste em prensar a peça em temperatura ambiente numa ferramenta com formato similar à de compactação onde é obtido os benefícios do ajuste de características dimensionais, aumento da densidade, redução de rugosidade, aumento de dureza e conformação de raios. Componentes sinterizados podem estar próximos a forma final, porém uma outra etapa complementar pode ser a usinagem em operações como por exemplo, a formação de roscas.

Tratamentos superficiais como camadas galvânicas, deposição química, mecânica ou zincagem podem ser requeridos. Algumas aplicações requerem impregnação com resina para preencher os poros da peça sinterizada e garantir a impermeabilidade da mesma.

Assim como aços convencionais, tratamentos térmicos como tempera e revenimento podem ser aplicados. Os tratamentos termoquímicos mais usuais com objetivo de aumentar a dureza da superfície são: a carbonitreção, cementação e nitreção. Por fim, o tratamento termoquímico de oxidação a vapor ou ferroxidação, que consiste na formação de uma camada de óxido de ferro estável e impermeável (Fe₃O₄), pode ser requerido quando se deseja os benefícios de selagem da porosidade (impermeabilização), aumento de resistência a corrosão, aumento da densidade, aumento da dureza e da resistência a compressão e ao desgaste (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 4 apresenta os objetivos específicos da dissertação (coluna da esquerda), e os materiais/métodos utilizadas para a execução de cada um dos objetivos (coluna da direita), descritos em detalhes a seguir.

Tabela 4 – Sequência das Atividades

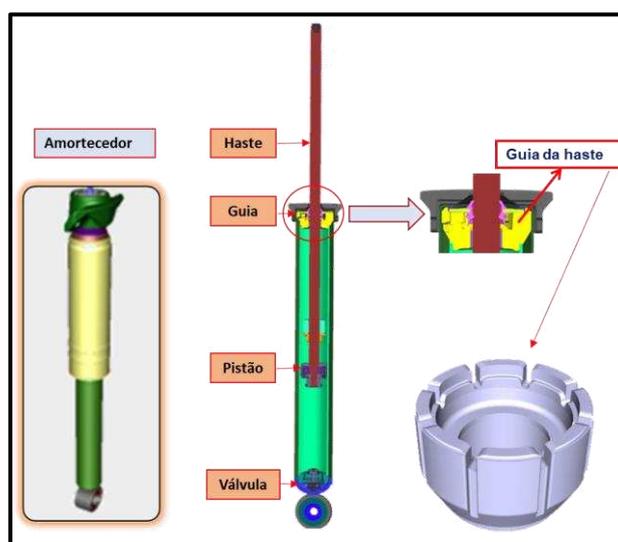
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS
Caracterizar produto Guia de amortecedor, equipamentos e processo envolvido	Densímetro com balança modelo Marte UX4200H para avaliar densidade a verde - Modelo de acordo com MPIF 42 ----- Equipamento para avaliar RV (resistencia a verde da material prima) - Modelo de acordo com MPIF 41 ----- Prensas do modelo CINCINATTI com 100 toneladas ----- Ferramental de compactação ----- Avaliação de Rugosidade do ferramental com uso de Rugosímetro Modelo Mahr Pethometer M4Pi de acordo com ABNT NBR ISO 4287
Detalhar técnica para seleção e priorização de defeitos a serem abordados	Matriz QA (<i>Quality Assurance</i>)
Entender o fenômeno envolvido com o defeito arrancamento com utilização de técnicas para descrição e estudo do problema	Técnica 5G ----- Técnica 5W e 1H
Definir a causa raiz do problema.	Diagrama de Ishikawa ----- Análise dos 5 Whys
Ações corretivas para eliminação da causa raiz.	Punção superior duplo (Dual upper punch) ----- Conceito "One Piece Flow" com utilização de esteira de transporte para produto verde
Conhecer o principal parâmetro de processo e sua influência no defeito arrancamento	Delineamento de experimentos (DOE)
Tornar o processo robusto de modo a garantir zero defeito	SOP (Standard Operating Procedure) ----- OPL (One Point Lesson) ----- MPInfo (Maintenance Prevention information) ----- Cinco questões para zero defeito

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

3.1 Caracterização do produto guia do amortecedor, equipamentos e processo envolvido

O componente utilizado neste estudo é denominado guia da haste, cujas características físicas são abordadas neste capítulo. A Figura 30, ilustra um modelo convencional de amortecedor cujos principais componentes são a haste, guia da haste, pistão e corpo de válvula. Em destaque, a guia da haste que tem como função o controle da passagem de óleo e a centralização do conjunto haste + pistão.

Figura 30 – Guia da haste e sua montagem no amortecedor.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021)

O produto em questão, é denominado guia da haste cuja função em um amortecedor é garantir a centralização e guiar os componentes centrais de um amortecedor. Este produto é produzido pelo processo de sinterizados de acordo com a especificação MPIF35–F008/35 (*Metal Powder Industries Federation*). Esta guia é obtida com dureza de 60 a 90 HRB (*Hardness Rockwell B*) e uma densidade do verde entre 6,30 à 6,50 g/cm³, a qual após o processo de sinterização gera um produto final com densidade de 6,45 à 6,85 g/cm³ (METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION, 2012).

A Figura 31, mostra esquematicamente o funcionamento da balança com a utilização do princípio de Arquimedes, seguindo a norma MPIF42. O princípio de Arquimedes estabelece que qualquer corpo imerso (E) em um fluido fica sujeito a uma força vertical (F), de baixo para cima cujo módulo é igual ao peso do fluido (P) deslocado (SILVA, 2021). Seguindo este princípio, o equipamento utilizado, é um densímetro com balança digital (METAL POWDER

INDUSTRIES FEDERATION, 2008), modelo Marte UX4200H. Com este equipamento, fica simplificada a medição de densidade na fábrica. Para garantir a densidade do produto final, no processo de compactação, a cada duas horas é retirado uma amostra para medição e registro.

Figura 31 – Esquema de montagem para medição de densidade.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A matéria prima utilizada na confecção do produto, é um pó metálico composto em 65% de material importado da Suécia do tipo escama (irregular) produzido pelo processo de redução, denominado pelo fornecedor como pó CS150 conhecido no mercado pelo nome de NC (*Normal Compressibility*). No processamento deste material também é adicionado lubrificante, 0,8 % de grafite e 0,2 % de cobre. O restante, é formado por um pó nacional produzido pelo processo de atomização denominado pelo fornecedor com pó ALD (*Atomized Low Density*). Esta matéria prima é fornecida em bags de 1 tonelada conforme mostra a Figura 32.

Figura 32 – Matéria Prima



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

Este material é compactado em prensas do modelo CINCINATTI com 100 toneladas que consegue com o uso de ferramental adequado, gerar um produto com densidade do verde desejada. Após a compactação do produto, utiliza-se fornos de sinterização com comprimento de 40 metros. As peças são acondicionadas em esteiras de aço inox que se movem dentro da zona quente a uma temperatura de 1100°C e atmosfera controlada com a combinação de Nitrogênio e Hidrogênio. A Figura 33, mostra a sua esquerda (a) um exemplo de prensa utilizada e a sua direita (b) um desenho esquemático do forno de sinterização.

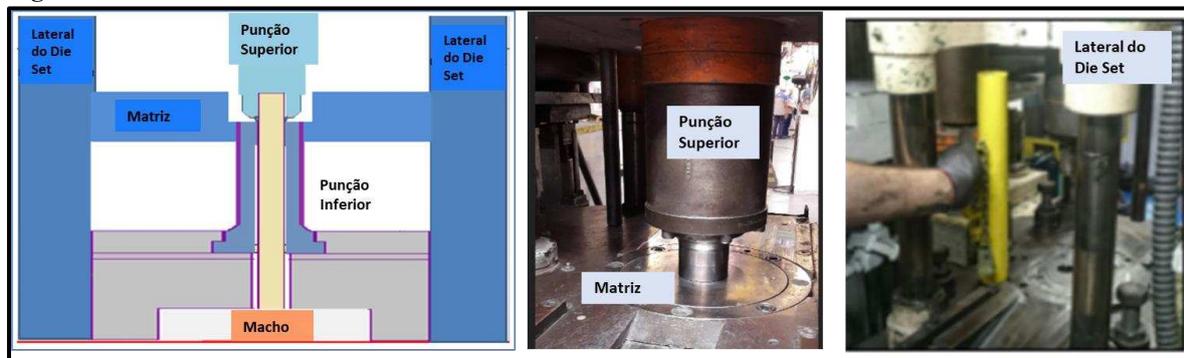
Figura 33 – Prensa e Forno.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021)

O ferramental utilizado no processo é composto de uma matriz de compactação, punção superior e punção inferior e macho. Este ferramental é montado previamente em um *die set* que após sua regulagem, é inserido na prensa de 100 ton. Este ferramental trabalha com rugosidade de 0,5 a 1,2 R_Z. A Figura 34, mostra esquematicamente o posicionamento do ferramental.

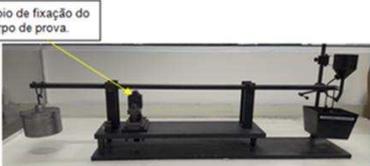
Figura 34 – Ferramental Utilizado



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

As propriedades avaliadas neste estudo, foram densidade do produto (demostrada na Figura 31), resistência a verde da matéria prima de acordo com MPIF41 (METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION, 2008). e rugosidade do ferramental medida de acordo com norma ABNT NBR ISO 4287 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002). O Quadro 5 mostra os equipamentos utilizados para realizar os controles necessários ao acompanhamento do processo.

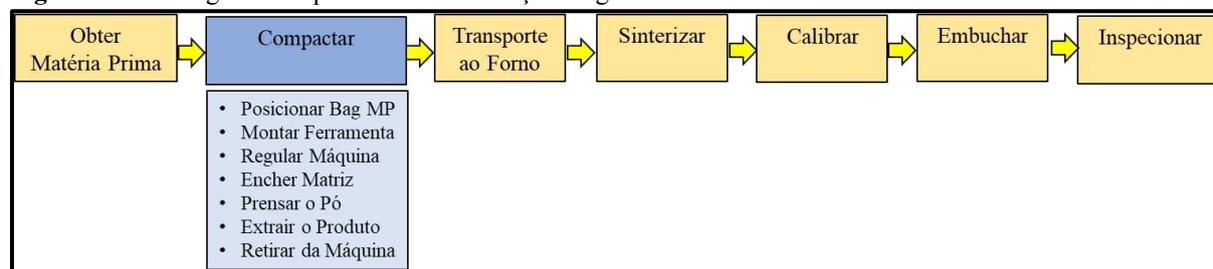
Quadro 5 – Equipamentos de Medição

Relação dos Equipamentos de Medição		
Propriedade	Equipamento	Fotografia
Resistência a Verde	Equipamento para medir RV Modelo de acordo com MPIF Standard 41	
Rugosidade do Ferramental	Rugosímetro Modelo Mahr Pethometer M4Pi de acordo com ABNT NBR ISO 4287:2002	

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A Figura 35, demonstra o fluxograma do processo para fabricação de guias de amortecedores. O ponto do processo em destaque (na cor azul) é a compactação, onde o produto é formado.

Figura 35 - Fluxograma do processo de fabricação de guias de amortecedores.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

3.2 Detalhar técnica para seleção e priorização de defeitos a serem abordados

Foi utilizada a matriz QA (*Quality Assurance*), para obtenção do índice de prioridade, por meio da multiplicação dos índices de frequência, custo, severidade e detecção. Este índice balizou a escolha de defeito a ser abordado (FORNO, 2017).

3.3 Entender o fenômeno envolvido com o defeito arrancamento com a utilização de técnicas para descrição e estudo do problema

A princípio, deve-se ir até o ponto de processamento do processo e utilizar a ferramenta *5G* de modo a observar o processo e obter dados. Em conjunto, utilizou-se a ferramenta *5WeIH* com o objetivo de buscar o entendimento do fenômeno envolvido com o defeito arrancamento.

3.4 Definir a causa raiz do problema

Formou-se um grupo onde levantou-se as possíveis causas e com o uso do Diagrama de Ishikawa associado à técnica dos *5 Whys*, buscou-se definir a causa raiz do problema.

3.5 Ações corretivas para eliminação da causa raiz

Foram tomadas ações para eliminação da causa raiz, com a mudança do ferramental para punção superior duplo (*Dual upper punch*) e introdução do conceito “*One Piece Flow*” com utilização de esteira de transporte para produto verde.

3.6 Conhecer o principal parâmetro de processo e sua influência no defeito arrancamento

Com o uso de delineamento de experimentos (DOE), buscou-se conhecer o principal parâmetro de processo e sua influência no defeito arrancamento, e também qual o melhor nível para se trabalhar com este parâmetro.

3.7 Tornar o processo robusto de modo a garantir zero defeito

A técnica WCM cita a necessidade da criação de instruções padronizadas em situação de alteração de método com o uso de SOP (*Standard Operating procedure*). Outros métodos auxiliares foram utilizados como por exemplo, a lição de um ponto (OPL - *One Point Lesson*) e Informação para Prevenção de Problemas (MP-Info - *Maintenance Prevention Information*). No fechamento da padronização, de modo a garantir que as ações tomadas foram suficientes para chegar a zero defeitos, utilizou-se a ferramenta denominada Cinco Questões para Zero Defeitos, estas questões, gerou o número *Q-Factor*.

O detalhamento das ferramentas é apresentado na revisão bibliográfica, bem como materiais e métodos. Os resultados, são apresentados em resultados e discussão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados ligados aos objetivos específicos da dissertação, conforme descritos na Tabela 4 (Materiais e Métodos), especificamente os itens 3.2 (Detalhar técnica para seleção e priorização de defeitos a serem abordados), 3.3 (Entender o fenômeno envolvido com o defeito arrancamento com a utilização de técnicas para descrição e estudo do problema), 3.4 (Definir a causa raiz do problema), 3.5 (Ações corretivas para eliminação da causa raiz), 3.6 (Conhecer o principal parâmetro de processo e sua influência no defeito estudado) e 3.7 (Tornar o processo robusto de modo a garantir zero defeito). O item 3.1 (Caracterização do produto guia do amortecedor, equipamentos e processo envolvido) tem seus resultados apresentados nos itens anteriores.

4.1 Detalhar técnica para seleção e priorização de defeitos a serem abordados

Os resultados apresentados neste item estão vinculados ao item 3.2 do Capítulo Materiais e Métodos (Detalhar técnica para seleção e priorização de defeitos a serem abordados). A Tabela 5 mostra a matriz QA, com números orientativos localizados na parte inferior da tabela onde é apresentado o Rank (1) com os 10 primeiros tipos de defeitos observados na empresa, baseado no índice de prioridade, descritos na coluna Descrição do defeito (2). Na versão apresentada da matriz QA, pode-se constatar que a maior pontuação obtida na coluna Priorização (6) foi o defeito arrancamento em guia da haste com 2136 pontos. A Tabela mostra na coluna Quantidade de Peças Refugadas em 12 meses (4), um valor de 180.222 peças. Verifica-se também que no mês corrente desta versão da matriz (5), a quantidade de 15.584 peças refugadas, ou seja, a maior entre os 10 defeitos verificados. Também é possível verificar nas colunas 4M (3), a maior pontuação por se tratar de um defeito relacionado a método. As colunas referentes a contribuição dos 4Ms (7), uma pontuação maior foi para o processo de compactação, especificamente 1.220 pontos são referentes ao M método.

Tabela 5 – Matriz QA contemplando defeito estudado.

MATRIZ QA											CONTRIBUIÇÃO DOS 4Ms																		
Rank	Descrição do defeito	4M			Frequencia	Qtd (Peças Refugadas em 12 meses)	Mês corrente	F	C	S	D	PRIORIZAÇÃO	Índice de Prioridade F.C.S.ΣD	SINTERIZADOS															
		MÃO	METHOD	MACHINE										MATERIAL	COMPACTAÇÃO						SINTERIZAÇÃO								
							FREQUENCIA	CUSTO	SEVERIDADE	ΣD			NOTA DE PESO PROCESSO	MÃO DE OBRA	PESO MO	METODO	MÁQUINA	PESO MÁQ	MATERIAL	PESO MP	NOTA DE PESO PROCESSO	MÃO DE OBRA	PESO MO	METODO	MÁQUINA	PESO MÁQ	MATERIAL	PESO MP	
1	ARRANCAMENTO EM GUIA DA HASTE	2	8	2	2	180.222	15.584	3	4	1	178	2136	8	306	2	1226	8	306	2	306	2	0	0	0	0	0	0	0	0
2	BATIDA EM PEÇA SHW	2	2	8	2	19.702	50	1	3	3	172	1648	8	471	2	471	2	941	8	471	2	0	0	0	0	0	0	0	
3	HASTE QUADRADA EM HASTES	2	2	8	2	29.048	1.148	5	5	3	20	1500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	BATIDA EM GUIA DA HASTE	2	2	8	2	18.589	649	1	2	4	177	1416	8	198	2	198,2	2	807	8	198	2	0	0	0	0	0	0	0	
5	TRINCADA EM ANEL SINCRONIZADOR	2	8	2	2	2.272	8	1	2	4	167	1336	8	187	2	0	8	762	2	187	2	0	0	0	0	0	0	0	
6	Ø DO CORPO FORA DO ESPECIFICAD EM HASTES	8	2	2	2	17.253	1.597	3	3	4	30	1083	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	DEFEITO SUPERFICIAL - Retifica EM HASTES	2	2	8	2	19.333	925	4	4	2	30	960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	Peça caída no tanque-cromação EM HASTES	8	2	2	2	24.242	123	4	4	3	17	816	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	TRINCADA EM POLIA VIRABREQUIM	8	2	2	2	154	144	1	1	4	185	740	8	422	8	103	2	103	2	103	2	0	0	0	0	0	0	0	
10	TRINCADA EM POLIA DE COMANDO	2	4	8	4	27	0	1	1	4	175	700	8	392	8	98	2	98	2	98	2	0	0	0	0	0	0	0	

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

4.2 Entender o fenômeno envolvido com defeito arrancamento com a utilização de técnicas para descrição e estudo do problema

Os resultados apresentados neste item estão vinculados ao item 3.3 do Capítulo Materiais e Métodos (Entender o fenômeno envolvido com o defeito arrancamento com a utilização de técnicas para descrição e estudo do problema). A partir da definição do defeito a ser estudado, partiu-se para o chão de fábrica e com o uso da técnica 5G, baseado na matriz QA, avaliou-se as condições iniciais com a checagem dos componentes de processo de fabricação, e foi verificado que o índice de rejeição no mês do início do projeto foi refugado 15.584 peças, conforme apresentado na Tabela 5. Seguindo a análise da matriz QA, foi verificado os pontos referentes à Método dentro do processo. A Tabela 6 mostra os registros disponíveis com o valor lido e o especificado onde o valor lido da densidade do produto a verde está próximo do valor mínimo especificado. A densidade do produto após sinterizar e a dureza seguiram a mesma tendência, ou seja, próximo ao mínimo da especificação. Verificou-se também a rugosidade do ferramental cujo valor estava próximo ao máximo do especificado e a resistência a verde da matéria prima, cujo valor apresentado estava na média da especificação.

Tabela 6 –Propriedades - Dados coletados durante 5G.

Propriedade	Ponto de avaliação	Unidade	Valor especificado	Valor lido
Densidade a verde	Produto em processo	g/cm ³	6,30 – 6,50	6,32
Densidade após sinterizar	Produto acabado	g/cm ³	6,45 - 6,85	6,47
Dureza	Produto acabado	HRB	60 - 90	66
Resistencia a Verde	Matéria prima	MPa	8,70 – 8,90	8,80
Rugosidade	Ferramental em processo	R _Z	0,50 - 1,20	1,10

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

Baseado nestes dados, conclui-se que o processo estava dentro do especificado, porém, com necessidade de ajustes. Foi solicitado para o operador ajustar o processo para um valor no meio da faixa dos valores especificados no processo, que como consequência, corrigiu também dureza e a densidade após sinterizar. Estes dados serviram de base para alimentar a ferramenta *5WIH*, no sentido de descrever o problema e o fenômeno envolvido.

A análise dos *5WIH* foi detalhada na Tabela 7 onde as três primeiras linhas descrevem a unidade operativa, célula e máquina, seguido das análises de (*What, When, Where, Who, Which e How*). Os dados contidos nestas análises, levam as conclusões visualizadas nas duas últimas linhas onde observa-se: A descrição do problema (Embora os valores lidos nas propriedades analisadas estejam dentro do especificado, encontrou-se após inspeção visual, peças faltando um pedaço na região do castelo em etapa anterior a sinterização) e o fenômeno revisado (Defeito denominado arrancamento devido esforço de tração no sentido da extração que gera quebra da peça com ocorrência na região de menor densificação da peça - castelo)

Tabela 7 — Utilização da técnica 5W1H.

5W,1H - Folha de Análise		
Unidade operativa	Sinterizados	
Célula:	Guias	
Máquina:	Prensa 41 - CINCINATTI - 100 TONELADAS	
What (Que)	*O que faz? Qual produto, máquina, material estava sendo utilizado? Qual é o tamanho?	Defeito observado no produto guia da haste do amortecedor produzido na prensa 41 (Cincinatti) com pó CS150 (NC) denominado arrancamento
When (Quando)	*Quando este fenômeno ocorre? Quando, na sequência da operação; inicialização, operação, problema intermitente, parada, setup?	Após a compactação do pó no ponto de extração do produto onde um pedaço da peça pode se desprender da peça em função de força de extração. A detecção ocorre após a inspeção visual
Where (Onde)	*Onde este fenômeno ocorre? Onde, no equipamento ou material este fenômeno é observado?	Na região de menor densificação da peça denominado castelo (onde a espessura da peça é mais fina) formada pelo punção superior
Who (Quem)	*Quem é afetado? Todos? Ou este problema afeta alguns individualmente ou coletivo? (Em caso afirmativo, quais informações eles podem oferecer?) Trata-se de habilidades relacionadas?	O defeito ocorre em todos os turnos independente do operador
Which (Qual)	*Qual os padrões e tendências que os fenômenos seguem? E.g. É o fenômeno mais frequente na Segunda-feira pela manhã? Depois de uma mudança? Ou é de natureza aleatória? Qual sentido os fenômenos acontecem? (Nota: Não há muitos fenômenos verdadeiramente aleatórios)	O defeito ocorre de modo aleatório porem sempre com o produto a verde ou seja entre a compactação e a sinterização.
How (Como)	*Como os equipamentos saíram do ideal? Quantas vezes o problema ocorre? Quanto custa este problema?	Verifica-se um esforço de tração no sentido da extração da peça da matriz onde um pedaço da peça pode se desprender. Verificado também a possibilidade de ocorrer esforço em batidas devido manuseio. Média de refugo em torno de 16.000 peças por mês.
Problema : Embora os valores lidos nas propriedades analisadas estejam dentro do especificado, encontrou-se após inspeção visual, peças faltando um pedaço na região do castelo em etapa anterior a sinterização		
Fenômeno Revisado: Defeito denominado arrancamento devido esforço de tração no sentido da extração que gera quebra da peça com ocorrência na região de menor densificação da peça (castelo)		

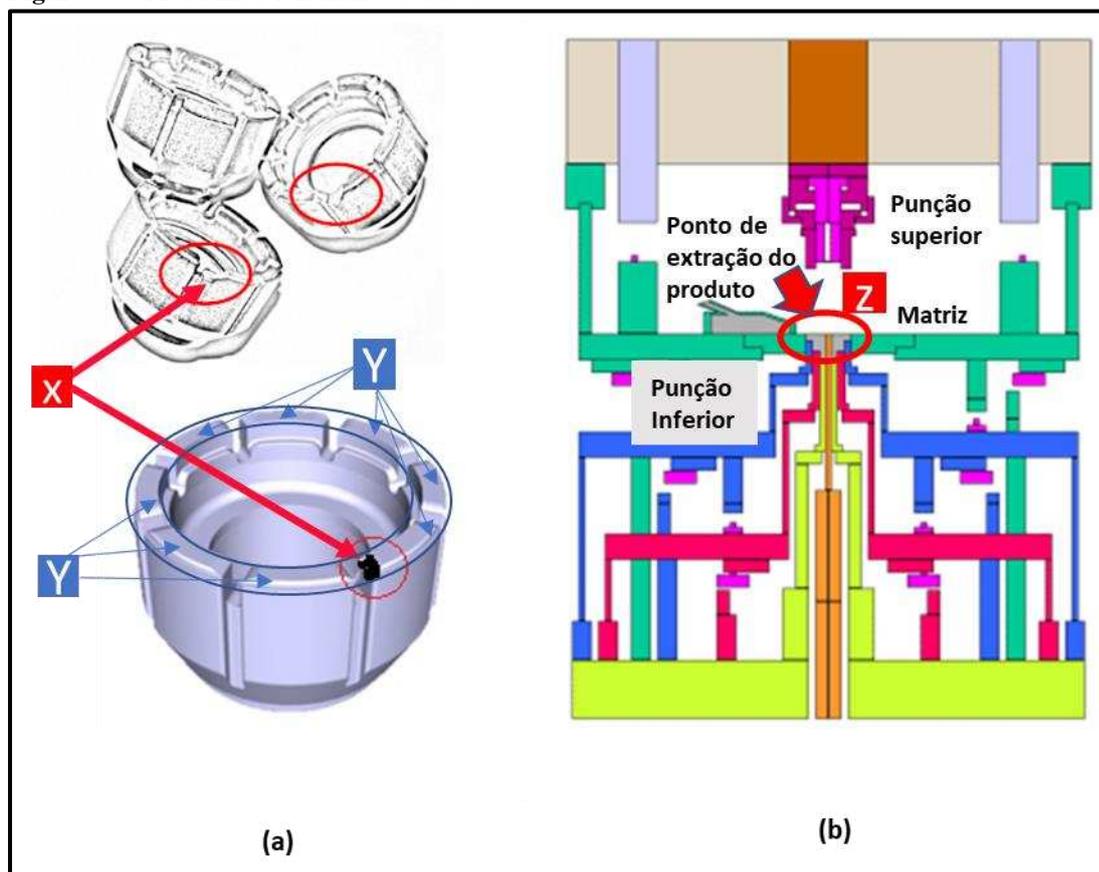
Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A Figura 36 (a) com setas na cor vermelha, ilustra o local na guia da haste de amortecedor onde ocorre o defeito de arrancamento (região x). A área delimitada por uma elipse com setas na cor azul (região y), é o conjunto denominado castelo, por onde flui o óleo quando a guia é montada no amortecedor. A região (y) é a cópia do formato da punção superior da ferramenta de compactação. Foi verificado que nesta região a espessura da parede compactada é a mais fina do produto. Adicionalmente, a Figura 36 (b) demonstra a área demarcada por uma elipse e indicada por uma seta na cor vermelha (região Z), a região da máquina onde ocorre o fenômeno. Após a prensagem, durante a extração do componente, devido a aderência no pó na superfície da matriz, ocorre um esforço pontual de tração no sentido da extração do produto da matriz. Para extrair o produto da matriz, é comum ocorrer este esforço, porém, se for elevado, acaba gerando a quebra no produto preferencialmente na região do castelo (y). A este esforço, atribuiu-se o fenômeno que gera a quebra da peça cujo nome do defeito é arrancamento. Economicamente não é viável controlar o esforço gerado no

ponto de extração do produto. Existe o controle da força de compactação, porém, não é suficiente para correlacionar com a magnitude dos esforços gerados na extração.

Um outro esforço, fora da região citada (z), poderia ocorrer no manuseio ou transporte do produto da saída da máquina até o carregamento no forno de sinterização e ambos foram estudados.

Figura 36 – Problema e fenômeno estudado.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A meta estabelecida, foi zerar a quantidade de refugo gerado devido o defeito arrancamento em guia de hastes.

4.3 Planejamento das atividades

Com objetivo de seguir a ordem das atividades citadas nos sete passos para solução de problemas, foi criado um cronograma do projeto. Em função dos dois primeiros passos (priorização do defeito a ser abordado e entendimento do fenômeno envolvido com defeito arrancamento), estarem concluídos nos primeiros seis períodos, seguindo a técnica, a Tabela 8

4.4 Definir a causa raiz do problema

Os resultados apresentados neste item estão vinculados ao item 3.4 do Capítulo Materiais e Métodos (Definir a causa raiz do problema).

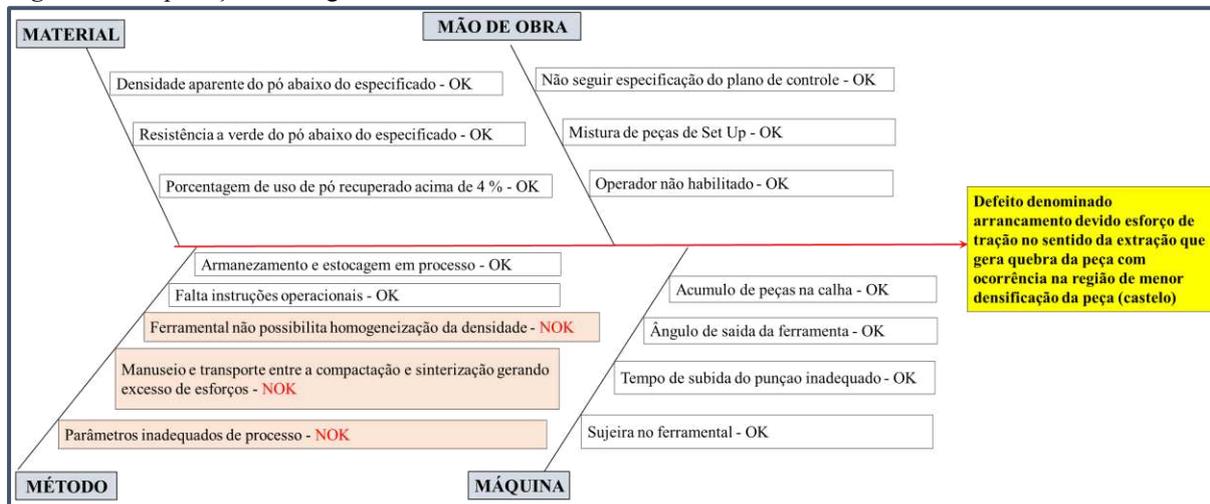
Um grupo constituído de profissionais da empresa foi formado para estudo do projeto e, de posse das definições obtidas nos itens 4.1 e 4.2; preparou-se um *brainstorm* de modo a levantar todas as possíveis causas do fenômeno estudado. A ferramenta utilizada foi o diagrama 4M, onde foi separado por Método, Mão de Obra, Matéria Prima e Máquina, todas as possíveis causas relacionadas ao fenômeno. Na análise de cada constatação inserida no diagrama, o grupo testou se realmente a causa potencial levantada poderia ser a causa raiz. A Figura 37, ilustra todas as possíveis causas levantadas para o fenômeno que ficou destacado em amarelo ao lado direito da figura.

Foi levantado a hipótese de a densidade aparente do pó estar fora do especificado de 2,60 a 2,70 g/cm³. Para testar esta causa, verificou-se recebimentos nos doze meses anteriores ao início do projeto e todos os certificados estavam em com resultado entre 2,63 à 2,68 g/cm³, ou seja, de acordo com a especificação. Face a esta constatação, o grupo definiu baseado em dados, que durante um ano, o material estava conforme configurando que a causa levantada, não poderia ser uma das causas potenciais. Seguindo a técnica, no diagrama de 4M, foi acrescentado um sinal de “OK” e descartou-se esta hipótese. De modo análogo, descartou-se a hipótese de a resistência a verde estar abaixo do especificado de 8,0 MPa mínimo, devido os resultados avaliados estarem entre 8,2 e 9,95 Mpa. Os registros de uso de pó recuperado, comprovam que no período avaliado, estavam de acordo com o especificado máximo de 4 % logo, esta causa também foi descartada. Com estas constatações, verificou-se que as hipóteses relacionadas a material, não poderiam ser consideradas como causa raiz.

A mesma análise foi realizada para as causas relacionadas a mão de obra onde foi possível constatar que os registros avaliados estavam de acordo com a especificação do plano de controle, operadores habilitados de acordo com a matriz de treinamento disponível e a impossibilidade da causa ser mistura de peças de Set Up, face ao volume de peças refugadas no período. Com estas constatações, as hipóteses relacionadas com mão de obra, foram descartadas. As hipóteses relacionadas com máquina, foram descartadas visto não haver acúmulo de peças na calha, o ângulo de saída da ferramenta estar com 6° (dentro do especificado de 4 a 8°), o tempo de subida do punção estar adequado e não ser detectado sujeira no ferramental. A primeira hipótese relacionada a método, foi descartada em função de não ser observado falhas no armazenamento e estocagem assim como a segunda hipótese visto que

todas as instruções de processos estarem disponíveis e atualizadas. A Figura 37, ilustra o resultado das análises citadas, onde as causas descartadas foram identificadas como OK. Em destaque, ficaram as três causas potenciais identificadas como NOK.

Figura 37 – Aplicação do diagrama 4M.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A primeira causa destacada como NOK, foi o ferramental utilizado, o qual dificulta a regulagem e a homogeneização da densidade. A segunda causa potencial destacada, foi o manuseio e transporte entre a compactação e a sinterização. A terceira causa potencial destacada, foram os parâmetros inadequados do processo.

Seguiu-se então, um aprofundamento das três causas destacadas, as quais serviram de entrada para a técnica dos 5 *Why's*. A Tabela 9, ilustra como a técnica foi usada. No formulário utilizado, o fenômeno está descrito na coluna à esquerda. O 1º Porque ficou com a causa a ser estudada, e posteriormente foram realizadas sucessivas perguntas de “Por que isso aconteceu?” (2ª, 3ª, 4ª e 5ª Porque) e continuou com a mesma pergunta até encontrar a causa raiz.

Segundo a Tabela 9, para o 1º Porque que está na primeira linha, ou seja, o ferramental não possibilita homogeneização da densidade, constatou-se que desde o projeto, trabalhava-se com punção superior único e sua utilização, não permite uma distribuição adequada do pó.

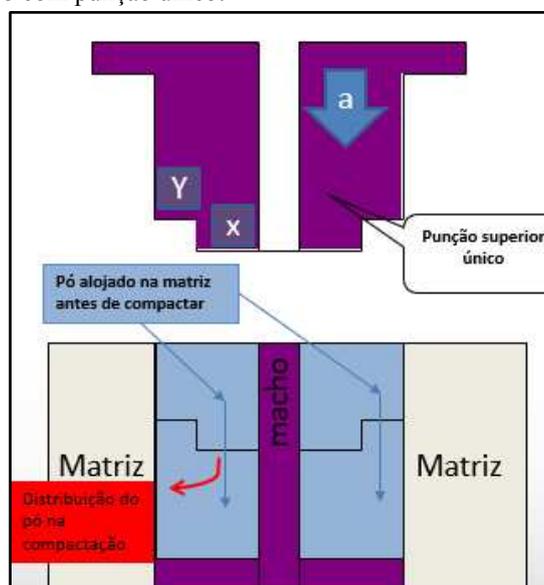
Tabela 9 – Aplicação da técnica dos 5 Why's.

5 Why's					
Fenômeno	1º Porque	2º Porque	3º Porque	4º Porque	5º Porque
Defeito denominado arrancamento devido esforço de tração no sentido da extração que gera quebra da peça com ocorrência na região de menor densificação da peça (castelo)	Ferramental não possibilita homogeneização da densidade	O conceito adotado para compactação não permite a transferência adequada de pó para compactar	Ferramenta tem punção superior único	O projeto do ferramental foi realizado desta maneira	O processo foi concebido desta maneira
	Manuseio e transporte entre compactação e Sinterização gerando excesso de esforços	Os esforços de retirada da peça da mesa rotativa, geram o risco de arrancamento	O castelo da peça pode não resistir a pressão e aos esforços requeridos nesta etapa do processo	No processo atual, existe a necessidade de uma leve pressão para manuseio e também o risco de batidas	
		Se as peças chocarem na região do castelo durante o transporte existe o risco de arrancamento	O processo atual de transporte é feito com o uso de carrinho mecânico sujeito a vibração ou quedas	O processo de transporte é feito em piso irregular	
	Se as peças chocarem na região do castelo durante carregamento do fomo existe risco de arrancamento	A virada da bandeja no fomo é feita com apoio inadequado	O processo de carregamento do fomo é manual		
Parametros inadequados de processo	os parametros definidos no desenvolvimento não levaram em consideração os riscos de arrancamento	Não foi efetuado um estudo aprofundado dos parametros envolvidos com foco no defeito	No desenvolvimento considerou-se a existencia de arrancamento como inerente ao processo		

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

Com o intuito de detalhar a primeira causa estudada (ferramental não possibilita a homogeneização da densidade), a Figura 38, ilustra esquematicamente o funcionamento do punção único e seu efeito para a distribuição do pó.

Figura 38 – Distribuição do pó com punção único.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

O punção superior único, se move na direção (a) no sentido de compactar o pó que previamente preencheu a matriz. No momento da compactação, a primeira parte do ferramental a comprimir o pó, é a face (x). À medida que o punção se desloca verticalmente para baixo, a face (x) começa a deslocar o pó em direção às paredes da matriz, antes que a face (Y) comece

a compactar o pó. Pela construção do ferramental, a face (Y) no produto fica sendo a região com menor densidade e conseqüentemente mais frágil. Esta região, além de apresentar menor densidade, é a região com parede mais fina no produto. Assim, o fato das faces (x) e (Y) serem fixas no ferramental, acaba por impedir uma distribuição homogênea do pó e faz com que exista variação de densidade no produto compactado. A combinação de densidade menor em uma região mais frágil levou a conclusão que o projeto do ferramental (punção superior único) gera uma distribuição de pó inadequada e foi considerado como uma causa que gera o defeito arrancamento de material.

A segunda causa, localizada no centro da Tabela 9 na coluna do primeiro porque, ou seja, o manuseio e transporte entre a compactação e sinterização, foi dividida em três subgrupos: o primeiro, iniciou-se no segundo porque, onde em função do processo requerer a transferência de peças da máquina para uma bandeja, seguido da alocação destas peças em um carrinho, foi evidenciado a existência de vários riscos de batidas de peças consideradas como esforços acima do aceitável. De acordo com o citado no item 2.3.2 da revisão bibliográfica, após a compactação, a forma da peça é mantida apenas pela coesão física entre as partículas do pó sendo assim, o produto é frágil com a possibilidade de quebrar com baixo esforço mecânico (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009). Baseado nesta condição, contactou-se que os riscos avaliados na operação, seriam suficientes para gerar o defeito e conseqüentemente serem a causa do problema. A figura 39, mostra esquematicamente o processo e os riscos existentes neste manuseio. Este processo, de acordo com a análise do quinto porque, foi concebido desta maneira sendo esta concepção, a causa raiz para este subgrupo.

Figura 39 – Risco de esforços acima do aceitável – descarga.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

O segundo subgrupo relacionado a manuseio, focou no transporte entre a prensa e o forno onde ficou evidenciado no quarto porque, a irregularidade do piso. A Figura 40 mostra o processo e os riscos existentes no transporte. Este processo, de acordo com a análise do quinto porque, foi concebido desta maneira sendo esta concepção, a causa raiz para este subgrupo

Figura 40 – Risco de esforços acima do aceitável – transporte.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

O terceiro subgrupo relacionado a manuseio, focou no carregamento das peças no forno de sinterização. Este processo, era manual e com apoio inadequado. A Figura 41 mostra o processo e os riscos existentes no carregamento do forno. Verificou-se então, que para os três subgrupos relacionados ao manuseio, na análise do quinto porque, a concepção do processo foi a causa raiz.

Figura 41 – Risco de esforços acima do aceitável – forno.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

Para a terceira causa da Tabela 9, localizado no primeiro porque na face inferior da tabela, ou seja, parâmetros inadequados do processo, a análise do quarto porque indica que no desenvolvimento do processo, o defeito arrancamento foi considerado como inerente ao

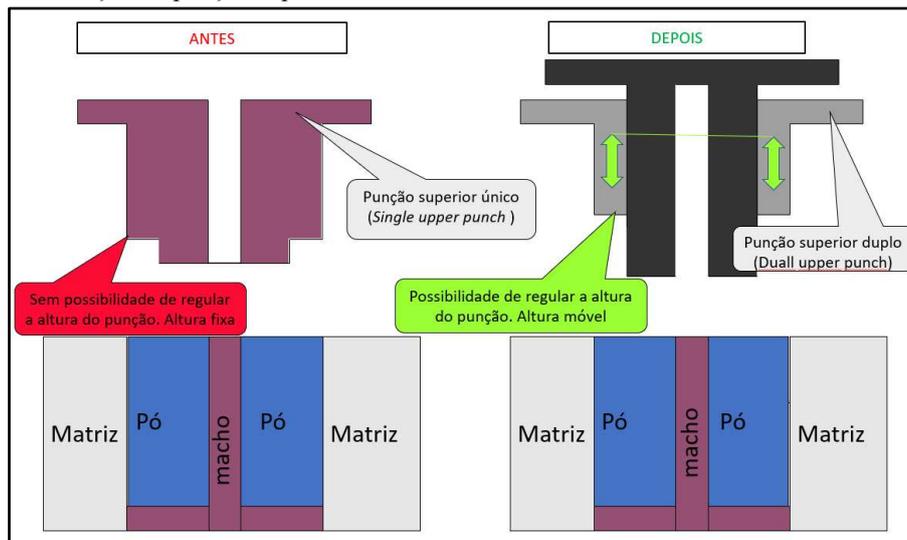
processo. Face a esta análise, um novo estudo mais aprofundado fez-se necessário. Definiu-se então, estudar esta causa em outra etapa do projeto pois, para modificar uma especificação de processo, seria necessário a garantia que os ferramentais em uso, fossem capazes de atender uma eventual demanda de alteração. Devido à complexidade do tema, definiu-se avaliar o resultado das ações para as duas primeiras causas antes deste estudo. Após a análise das eventuais causas, seguiu-se o planejamento de tomar ações para eliminá-las.

4.5 Ações corretivas para eliminação da causa raiz

Os resultados apresentados neste item estão vinculados ao item 3.4 (Definir a causa raiz do problema) e ao item 3.5 (Ações corretivas para eliminação da causa raiz) do Capítulo Materiais e Métodos

O planejamento das ações levou em conta os custos envolvidos e os benefícios previstos com sua implantação. Pelo fato de haver mais de uma ação envolvida, decidiu-se implementar uma ação por vez de modo a avaliar os resultados. A primeira ação implementada foi a modificação do ferramental. Para ser possível a regulagem da altura do punção, o ferramental foi modificado para punção superior duplo (*Dual upper punch*). Com esta ação foi possível obter uma melhor distribuição do pó e como consequência, a redução da variação de densidade no produto. Anterior a ação, a densidade na região do castelo, estava em $6,30 \text{ g/cm}^3$ enquanto nas demais regiões, $6,40 \text{ g/cm}^3$. Com a alteração, a densidade ficou em valores de $6,42 \text{ g/cm}^3$ em todas as regiões da peça garantindo assim a homogeneização da mesma. A Figura 42 mostra esquematicamente a alteração realizada. Na situação anterior as ações, trabalhava-se com punção superior único (*Single upper punch*) que devido trabalhar com altura fixa não havia possibilidade de regular a posição do punção. Com a alteração do projeto da ferramenta, passou-se a trabalhar com punção superior duplo (*Dual upper punch*) onde existe a possibilidade de regular sua altura, ou seja, torna-se possível uma distribuição de pó adequada reduzindo assim, a variação de densidade entre o castelo e demais pontos na peça.

Figura 42 – Modificação do punção superior.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A segunda ação implementada, foi a eliminação dos riscos relativos a manuseio e transporte. A solução encontrada, foi a introdução do conceito “*One Piece Flow*” no sentido de eliminar o estoque *WIP (Work in process)* entre os processos de compactação e sinterização. Com a criação de esteiras transportadoras, foi possível fazer a ligação entre os processos de compactação e sinterização sem a necessidade de manuseio para descarregar a prensa, transporte em carrinhos e carregamento manual do forno. Foi elaborado um cálculo para balanceamento da linha de modo que a peça saia da prensa de compactar em formato de fila sem a necessidade de estoque intermediário.

A Figura 43 ilustra as alterações efetuadas. No lado esquerdo da Figura (a), verifica-se a saída das peças da máquina em uma calha com redutor de velocidade de modo a garantir a entrada de peças na esteira de modo suave. No centro da Figura (b), após o transporte da máquina para uma esteira principal, foram criadas trilhas nas esteiras conseguindo um fluxo contínuo e a separação física de cada produto. No lado esquerdo da Figura (c) verifica-se o carregamento uniforme de peças no forno. Todas as operações manuais foram substituídas por transporte em esteira. Os ganhos de redução de refugo com este projeto, estão detalhados no item 4.5.1, foram associados a uma melhoria significativa com a eliminação de estoque e otimização do transporte entre as operações. Esta ação foi realizada com a integração dos pilares *QCS (Quality and Customer Safety)*, *LCS (Logistic and Customer Service)* e *EEM (Early Equipment Management)*. Este tipo de integração é primordial para o funcionamento da técnica *WCM*.

Figura 43 – Transporte por esteira.

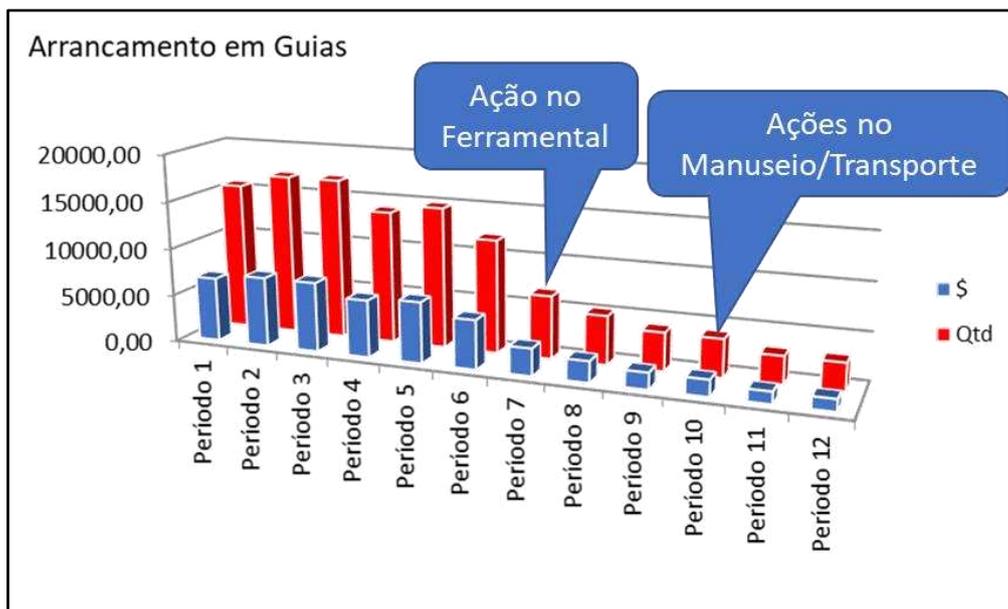
Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

A ação referente à parâmetros de processo, ficou condicionada ao resultado das duas ações citadas.

4.5.1 Análise dos resultados

Como resultado das ações tomadas, obteve-se uma melhora significativa com a redução do refugo. A Figura 44 ilustra os resultados obtidos de forma gráfica onde a barra vermelha significa a quantidade de peças refugadas nos períodos avaliados, e a barra azul os custos referentes a este refugo. A média dos primeiros 6 períodos anteriores as ações no ferramental (punção) e manuseio, foi de 16.121 peças refugadas. Entre o sétimo e o nono período, após as ações com o ferramental, a média do refugo caiu para 5.257 peças, ou seja, uma redução de 67% em relação à média dos aos seis primeiros períodos analisados. Entre o décimo e o decimo segundo período, após as ações de redução do manuseio e transporte, o refugo caiu para média de 3.264 peças por período, ou seja, redução de 80% em relação à média dos 6 primeiros períodos. Analisando individualmente o valor do decimo segundo período, encontra-se o refugo de 2893 peças. Comparando este valor com a média dos seis primeiros períodos, obtém-se uma redução significativa de 82 % no refugo, com tendência de queda, porém, ainda aquém à meta estabelecida pela técnica WCM, que é igual a zero peças refugadas por período.

Figura 44 – Resumo dos resultados.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

Pelo fato de ainda haver espaço para se atingir a meta de zero defeitos, chegou-se à constatação que o grupo deveria retornar ao estudo da terceira causa, ou seja, parâmetros inadequados para o processo. O estudo aprofundado dos parâmetros levou a uma nova rodada de ações com o uso de técnica mais avançada, ou seja, o delineamento de experimentos.

4.6 Conhecer o principal parâmetro de processo e sua influência no defeito arrancamento com uso de delineamento de experimentos (DOE)

Os resultados apresentados neste item estão vinculados ao item 3.6 do Capítulo Materiais e Métodos.

A primeira etapa do estudo, foi a definição dos fatores para realização dos testes. Com o andamento do projeto, o grupo teve a oportunidade de melhor conhecer o processo e avaliar quais os parâmetros estariam relacionados com a resposta esperada. Conforme demonstrado na Tabela 10, a resposta esperada (*output*) foi o índice de ppm (peças defeituosas). Pelo fato de nas etapas anteriores ocorrer uma redução do índice de refugo, o grupo definiu padronizar os testes com 10.000 peças visto que esta quantidade seria suficiente para validar as diferenças entre os níveis do experimento.

Definiu-se utilizar um experimento fatorial com três fatores e dois níveis, ou seja, $2^3 = 8$ experimentos. As variáveis de entrada (*input*) foram rugosidade da ferramenta (medida em Rz), a densidade do produto (medida em g/cm^3) e o tipo de matéria prima utilizada (pó)

representado numericamente pela sua resistência a verde (medida em MPa). Para rugosidade da ferramenta, utilizou-se como nível (-) uma ferramenta no final de sua vida útil com rugosidade de 1,2 R_Z e para o nível (+) uma ferramenta nova cujo valor de rugosidade foi 0,5 R_Z. Para densidade, utilizou-se como base para nível (-), uma faixa no mínimo da especificação atual do processo (6,30 a 6,40 g/cm³) e para nível (+), uma faixa com 0,10 g/cm³ acima do máximo da especificação atual do processo (6,60 a 6,70 g/cm³). Por fim, para definição da matéria prima, para o nível (-), foi utilizado um pó com predominância de morfologia do tipo regular, produzido pelo processo de atomização com resistência a verde menor que 7,5 MPa, denominado pelo fornecedor, como ALD e para o nível (+) um pó importado com morfologia predominante do tipo irregular, produzido pelo processo de redução cuja resistência a verde é maior que 9,5 MPa denominado pelo fornecedor como NC.

Tabela10 – DOE - Definição de variáveis e níveis

Variáveis de entrada (Input)		Níveis		Resposta esperada (Output)
		(-)	(+)	
A	Rugosidade da ferramenta (Rz)	Ferramenta usada (1,2)	Ferramenta nova (0,5)	ppm (peças defeituosas)
B	Densidade (g/cm ³)	6,30 / 6,40	6,60 / 6,70	
C	Resistencia a verde da Materia prima (Mpa)	ALD (RV < 7,5)	NC (RV > 9,5)	

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

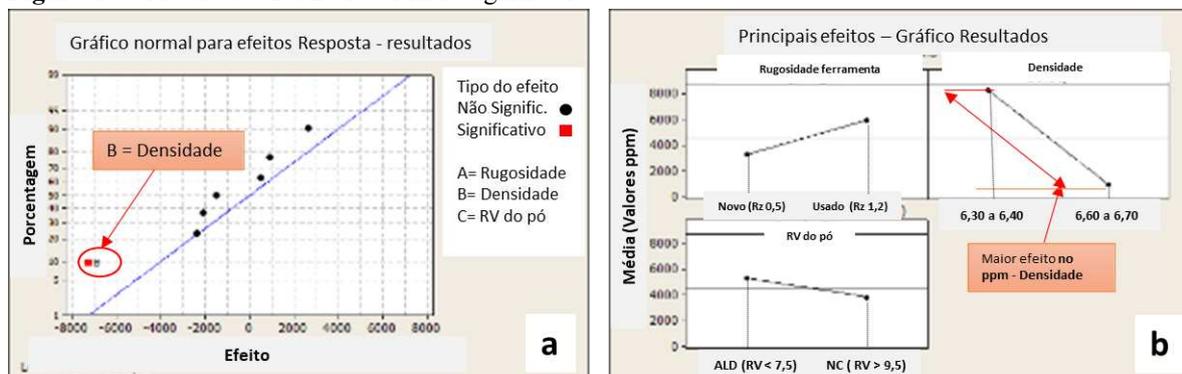
O planejamento da ordem de realização dos experimentos foi definido com auxílio do software MINITAB. As experiências foram conduzidas com acompanhamento do time realizando a inspeção logo após a saída da peça da máquina. Os resultados foram tabulados no Tabela 11. Para facilitar visualização, a tabela foi ordenada de modo que os valores do resultado (ppm), ficaram em ordem crescente. Em uma primeira análise, foi possível visualizar o efeito da densidade onde quanto maior o valor (6,60 a 6,70 g/cm³), menor seria a resposta (ppm). Na primeira linha da tabela, na experiência número 2 (segunda coluna) verificou-se o resultado de zero ppm, indicando a possibilidade de se atingir zero defeitos. Este resultado estava relacionado com a densidade entre 6,60 a 6,70, associado a ferramenta no final da vida e uso de pó com resistência a verde maior. Na última linha da tabela, na experiência número 7 (segunda coluna) verificou-se na coluna resultados, o valor de 13.237 ppm ou seja, a pior condição que estaria relacionada com a densidade no mínimo da especificação (6,30 a 6,40 g/cm³) associada a ferramenta no final de vida e o uso de pó com resistência a verde menor.

Tabela 11 – DOE – Resultados dos testes.

Classificação dos resultados	Ordem dos experimentos	Rugosidade da Ferramenta (Rz)	Densidade (g/cm ³)	Materia prima RV (Mpa)	Resultado (ppm)
1	2	Usada (Rz 1,2)	6,60 a 6,70	NC (RV >9,5)	0
2	3	Nova (Rz 0,5)	6,60 a 6,70	ALD (RV <7,5)	435
3	4	Nova (Rz 0,5)	6,60 a 6,70	NC (RV >9,5)	870
4	1	Usada (Rz 1,2)	6,60 a 6,70	ALD (RV <7,5)	2433
5	6	Nova (Rz 0,5)	6,30 a 6,40	ALD (RV <7,5)	5226
6	5	Nova (Rz 0,5)	6,30 a 6,40	NC (RV >9,5)	6490
7	8	Usada (Rz 1,2)	6,30 a 6,40	NC (RV >9,5)	7926
8	7	Usada (Rz 1,2)	6,30 a 6,40	ALD (RV <7,5)	13237

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

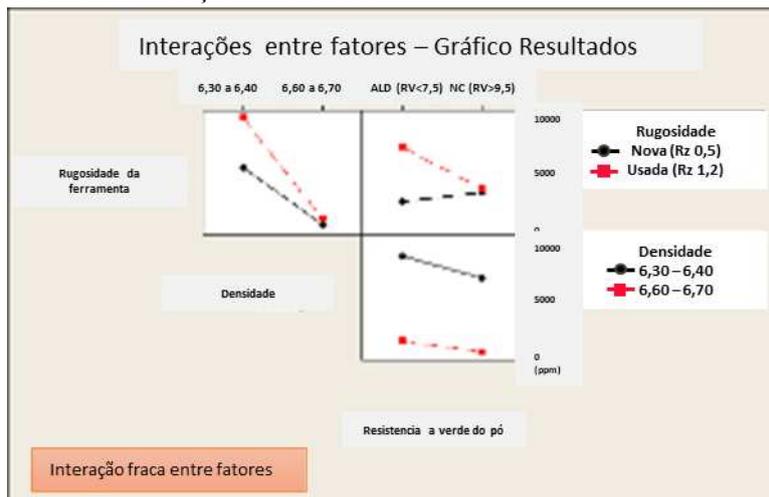
Uma análise mais aprofundada com a verificação das interações entre os fatores foi realizada com o auxílio de gráficos gerados pelo software MINITAB. Os gráficos na Figura 45, mostram que a densidade é o fator mais significativo do experimento. Na Figura 45(a), ficou destacado com uma elipse vermelha indicada por uma seta o ponto referente a densidade fora da reta no gráfico normal dos efeitos. A Figura 45 (b) demonstra graficamente valores menores de ppm quando trabalhado com densidade entre 6,60 g/cm³ e 6,70 g/cm³ e uma inclinação mais acentuada que em outros fatores comprovando assim, a influência deste fator.

Figura 45 – Resultados DOE –Fator mais significativo

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

Para completar a análise, procedeu-se a verificação da interação entre os fatores. Os gráficos da Figura 46 demonstram a inexistência de interação entre os fatores densidade e o tipo de pó (gráfico do quadrante inferior esquerdo onde as linhas são paralelas) e interação fraca entre os demais fatores (gráficos da parte superior).

Figura 46 – Resultados DOE – Interação entre fatores



Fonte ACERVO PESSOAL (2021)

Assim, o fator significante é a densidade e como contramedida, alterou-se a especificação deste parâmetro onde antes trabalhava-se com densidade de processo entre 6,30 à 6,50 g/cm³ e passou a trabalhar com densidade de processo entre 6,50 à 6,70 g/cm³. Esta definição levou em conta os custos com aumento de consumo de pó comparado ao benefício do atingimento de zero defeitos para as causas atacadas do defeito estudado.

Após a implantação das modificações, uma nova rodada de análise de resultados foi conduzida. O gráfico da Figura 47, mostra a evolução do projeto com o atingimento de zero defeito. Verificou-se no período 13 uma nova queda na quantidade de peças rejeitadas com os experimentos do DOE e no período 14, o atingimento da meta de zero defeitos.

Figura 47 – Resumo dos resultados após DOE.



Fonte ACERVO PESSOAL (2021).

Foi possível então, observar que existe a viabilidade do atingimento de zero defeitos. Não ocorreu o retorno das causas que geravam o defeito de arrancamento. Seguindo a técnica, o grupo seguiu para a última fase com a padronização e revisão do método e procedimentos.

4.7 Tornar o processo robusto de modo a garantir zero defeito

Os resultados apresentados neste item estão vinculados ao item 3.7 do Capítulo Materiais e Métodos (Tornar o processo robusto de modo a garantir zero defeito)

Por se tratar de uma causa referente ao método, fez necessário garantir a padronização. Embora as ações tomadas estivessem devidamente implantadas e validadas com zero defeitos conforme verificado na Figura 47, fez-se necessário garantir que as condições de zero defeito se mantivessem com o passar do tempo. A padronização foi realizada com a criação do Procedimento Operacional Padrão (SOP - *Standard Operating Procedure*), apresentada no item 2.1.3.6 de modo a ficar claro a nova especificação de processo para densidade a verde, o ferramental utilizado (*Dual upper punch*) e o procedimento a seguir pelo operador na realização das regulagens da máquina, para que seja atendida a especificação estabelecida no processo com a densidade de 6,50 à 6,70 g/cm³. Foi criada uma Informação para Prevenção de Problemas (MP-Info - *Maintenance Prevention Information*) com intuito da engenharia utilizar as alterações como lição aprendida em novos projetos. Para facilitar o treinamento dos operadores, foi criada uma Lição de um ponto (OPL - *One Point Lesson*).

Assim como realizado no item 4.2 (segundo técnica 5G), uma nova coleta de dados foi realizada no sentido de auditar o processo e garantir que a padronização gerou resultados de acordo com o definido para o produto e processo. A Tabela 12, mostra que a densidade a verde estava com a especificação de processo revisada após as ações, e se encontrava em torno da média (6,58 g/cm³). A densidade após sinterizar, assim como a dureza, seguiram a mesma tendência de aumento e se mantiveram dentro do especificado. A matéria prima se manteve nas mesmas condições, ou seja, na média da especificação. Para realização do DOE, foi confeccionado um novo ferramental com rugosidade no mínimo do especificado. Como os resultados apresentados no DOE para esta condição de ferramental foram satisfatórios, seguiu-se a produção com a rugosidade de 0,60 R_Z ou seja, no mínimo do especificado.

Tabela 12 - Avaliação das propriedades após ações.

Propriedade	Ponto de avaliação	Unidade	Valor especificado	Valor lido
Densidade a verde (* Revisado após ações)	Produto em processo	g/cm ³	6,50 – 6,70	6,58
Densidade após sinterizar	Produto acabado	g/cm ³	6,45 - 6,85	6,73
Dureza	Produto acabado	HRB	60 - 90	81
Resistencia a Verde	Matéria prima	MPa	8,70 – 8,90	8,80
Rugosidade	Ferramental em processo	R _z	0,50 - 1,20	0,60

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

O fechamento da padronização foi realizado com as cinco questões para zero defeito conforme demonstrado no Tabela 13. O lado esquerdo (na cor azul) estão as questões, no centro (coluna operações) as três situações de resposta onde: A corresponde a 1 ponto, ou seja, a pior pontuação; B corresponde a três pontos, ou seja, uma situação intermediária e C corresponde a 5 pontos, onde considera-se possível trabalhar com zero defeitos.

Na coluna à direita (Nº de parâmetros analisados), encontra-se o número 1 (no caso a densidade), as situações anteriores e após o projeto (Antes e Depois). Seguindo a técnica, para Questão 1, conclui-se que a SOP é de fácil compreensão, com pontuação de cinco pontos. A Questão 2, comprovou que o padrão é fácil de acompanhar com pontuação de cinco pontos. A Questão 3 levou em conta a possibilidade de erro humano e por isso, concluiu-se que o padrão não é 100% eficaz gerando a pontuação com a nota 3 pontos. Na Questão 4 foi observado que a localização do padrão é adequada com pontuação de cinco pontos. Na Questão 5 foi comprovado que o operador estava diretamente envolvido e aprovou o documento, gerando assim, a pontuação de cinco pontos. Baseado nos resultados da Tabela 13, na última linha, verifica-se que o Q-Factor obtido, foi de 92%. A ferramenta considera que acima de 84 % de Q-Factor, é o suficiente para trabalhar com zero defeitos.

Baseado nestes resultados, o projeto foi considerado eficaz e atingiu a meta estabelecida de zero defeitos.

Tabela 13 – Cinco questões para zero defeito (aplicação).

FATOR		Método		
UNIDADE OPERATIVA		Cluster 4 - Guias		
Time				
A=1 B=3 C=5	Operações		N° de parametros analisados (1)	
			Antes	Depois
1 Este padrão (Instrução de Trabalho) está claramente definida?	A	Não existe um padrão	1	
	B	Existe um padrão, mas falham em detalhes e ajudas visuais não existem ainda.		
	C	Existe uma detalhada SOP Visual (80% visual) que todos operadores podem facilmente compreender.		5
2 É possível seguir o padrão estabelecido?	A	Não é possível.		
	B	É possível, porém difícil	3	
	C	É fácil de acompanhar		5
3 O padrão é eficaz?	A	Não o suficiente, alto risco de erro.	1	
	B	É eficaz , mas ainda existe uma margem de erro.		3
	C	Em 100% dos casos, a qualidade é garantida.		
4 Onde o padrão está localizado?	A	O padrão está disponível, mas não é visível da estação de trabalho.	1	
	B	O padrão está na estação de trabalho e visível, mas não na linha de visão do operador.		
	C	Padrão está na estação de trabalho, é claramente visível e está na linha de visão do operador quando executa seu trabalho		5
5 O operador está envolvido na definição do padrão?	A	O operador não está envolvido com a geração do padrão.	1	
	B	O operador da estação revisou e aprovou a instrução de trabalho.		
	C	O Operador estava diretamente envolvido com o conteúdo do padrão e aprovou o documento		5
		Total	7	23
		Q - Factor (%)	28,0%	92,0%

Fonte: ACERVO PESSOAL (2021).

5 CONCLUSÕES

Abaixo estão descritas as conclusões relacionadas aos itens descritos nos objetivos específicos (item 1. Introdução), também apresentados sequencialmente no item 3 (Materiais e Métodos) e item 4 (Resultados e Discussão).

5.1 Detalhar técnica para seleção e priorização de defeitos a serem abordados

A utilização da matriz QA levou ao conhecimento dos principais defeitos observados na empresa com a priorização do defeito arrancamento. Os dados relacionados a quantidade de peças refugadas e a indicação da relação deste defeito com o método de trabalho, contribuíram de modo satisfatório para a continuidade do projeto e utilização das técnicas da qualidade apropriadas.

5.2 Entender o fenômeno envolvido com o defeito arrancamento com o uso de técnicas para descrição e estudo do problema

A utilização das técnicas *5G e 5Why*, baseado em dados oriundos da matriz QA, corroborou para a correta definição do problema e o fenômeno envolvido com o defeito arrancamento que atuaram de modo fundamental para o entendimento em detalhes do processo envolvido.

5.3 Planejamento das atividades

O planejamento seguiu a ordem das atividades citadas nos sete passos para solução de problemas e seguiu corretamente a técnica balizando o acompanhamento de modo eficaz a conclusão do projeto período definido.

5.4 Definir a causa raiz do problema

O grupo seguiu a técnica com a correta utilização do diagrama 4M e a técnica dos 5 *Why's* onde foi possível testar todas as possíveis causas envolvidas e atender ao objetivo de chegar à causa raiz.

5.5 Ações corretivas para eliminação da causa raiz

As ações tomadas conseguiram reduzir o refugo em 82% com tendência de queda comprovando os resultados positivos com a correta utilização da técnica.

5.6 Conhecer o principal parâmetro de processo e sua influência no defeito arrancamento

O estudo em delineamento de experimentos foi conduzido de modo satisfatório com aprimoramento do conhecimento do time envolvido em ferramenta mais avançada. O resultado, levou ao conhecimento e atuação no principal parâmetro do processo, ou seja, a densidade do produto à verde.

5.7 Tornar o processo robusto de modo a garantir zero defeito

A utilização das cinco questões para zero defeito, levou ao fechamento do projeto com o atingimento de Q-Factor de 92% suficiente para o atendimento da meta estabelecida. A importância deste fechamento, relaciona-se com a motivação das pessoas envolvidas quando um projeto consegue atingir uma meta audaciosa e pode servir de exemplo para seguir a técnica em outros defeitos descritos na matriz QA.

Os resultados mostram que ao usar a técnica WCM associada a atuação do pilar QCS, obteve-se zero defeitos para arrancamento na região do castelo. Este resultado contribuiu significativamente para a redução de refugo e a comprovação da redução de custos da não qualidade em produto caracterizado como guia da haste de amortecedores. Está diretamente ligada aos resultados obtidos, a utilização de ferramentas da qualidade como a técnica para seleção e priorização de defeitos, análise do fenômeno envolvido, definição da causa raiz do problema com as devidas ações para sua eliminação, conhecimento do principal parâmetro do processo e a obtenção de um processo robusto com a garantia de zero defeitos. A correta utilização das ferramentas da qualidade aliadas ao cumprimento da meta estabelecida no projeto, leva a conclusão que o objetivo geral e os objetivos específicos foram cumpridos.

Pode-se concluir que a técnica do pilar QCS quando aplicada corretamente, é capaz de garantir zero defeitos. O nível de melhoria alcançado em um projeto da qualidade pode ser expandido para outras áreas gerando a integração de todos os setores da empresa e a motivação de todos empregados para obter melhoria contínua. Embora este trabalho esteja focado em relações entre uma indústria de autopeças e montadoras de veículos, em um contexto mais amplo, o conceito de manufatura de classe mundial é válido para qualquer ramo de atividade industrial. O sucesso apresentado neste trabalho, foi divulgado de modo a refletir na aceitação da técnica por clientes e fornecedores. Por outro lado, somente a visualização interna das melhorias nos custos da não qualidade, já é um dado relevante para as empresas que seguirem a técnica WCM com a certeza que este é o caminho ideal no ramo industrial.

6 - REFERÊNCIAS

- ANTONINI, E. **Quality & Customer Safety: Training Material - WCM QC Central Team**. 2ª. Edição, São Paulo: Marelli, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9001: Sistemas de gestão da qualidade**. 3ª Edição, 2015.
- BARBOZA, J. S. **Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais - Departamento de Metalurgia), UFRGS, Porto Alegre, p. 88. 2009.
- BARBOSA, L. P. **Caracterização quanto a corrosão de filtros de aço inoxidável AISI 316 sinterizados**. Dissertação (Mestrado em Ciências – Departamento Tecnologia Nuclear - Materiais), IPEN, São Paulo, p. 104. 1999.
- BARROS NETO, B.; SCARMINO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 3ª Edição. Campinas: Editora da UNICAMP, p.412. 2007.
- BORGES, R. C.; DE OLIVEIRA, E. H. **World Class Manufacturing (WCM): estudo de caso da implantação do pilar controle da qualidade no processo de cromação de uma empresa do setor automotivo no sul de Minas Gerais**. Revista Exacta - EP. São Paulo, v. 14, n. 1, p. 85-96. 2016.
- CALICCHIO, L. **Efeito do'shot peening'sobre a nitretação de peças de ferro produzidas por metalurgia do pó**. Dissertação (Mestrado em Ciências – Departamento Tecnologia Nuclear - Materiais), IPEN, São Paulo, p.107. 2009.
- CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó: Técnica e Produtos**. 4ª Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 358. 2001.
- COSTA, T. B; MENDES, M. A. **Análise da causa raiz: Utilização do diagrama de Ishikawa e Método dos 5 Porquês para identificação das causas da baixa produtividade em uma cacauicultura**. In Anais do X SIMPROD - Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, Sergipe, p. 1-11. 2018.
- DAVIS, J. R.; et al. **Metals Handbook Desk Edition**. 2ª Edição. ASM international, p. 2571. 1998.
- DI CROCE A. **Focused Improvement: Training Material - WCM QC Central Team**. 7ª. Edição. São Paulo: Marelli, 2017.
- DO SANTOS, J. P.; et al. **Obtenção de aço rolamento pela rota da metalurgia do pó**. Universidade do Vale do Paraíba. São Jose dos Campos, v. 15, 2009.

ERGEST, K. **QC Book of Knowledge: Training Material - WCM QC Central Team**. 5ª Edição. São Paulo: Marelli, 2014.

FORNO G. **Quality Control Book of Knowledge**. Training Material Marelli - WCM Central Team. 3ª Edição. São Paulo: Marelli, 2017.

FERRANTE V. **People Development – Basic Information: Training Material - WCM QC Central Team**. 2ª Edição. São Paulo: Marelli, 2016.

GONÇALVES, F. F.; GUIMARÃES I. A. D.; RAONI B. **Manufatura de classe mundial (WCM) como uma jornada de mudança organizacional: o caso de uma rede de fornecedores da indústria automobilística**. In X Encontro Mineiro de Engenharia de Produção, Juiz de Fora, v 15, p. 1-13. 2014.

GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. 1ª Edição. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, p. 320. 2009.

GUEYDAN, H.; BLANCHARD, P. **Processo de prensagem única e sinterização única para a produção de artigos sinterizados, ferramenta para compressão de pó metálico para formar compactos para sinterização, e, artigo sinterizado**. Patente nº PI 9811300-3A, INPI, 2000.

HARMON R. L.; LEROY P. D. **Reinventando a fábrica: Conceitos modernos de produtividade aplicados na prática**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Campus, p. 380. 1991.

INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE. **IATF – 16949 – Requisitos de Sistema de Gestão da qualidade para as organizações de produção automotiva e de peças de reposição**. 1ª Edição, 2016.

JURAN, J. M.; GRZYNA, F. M. **Controle da Qualidade Handbook**. 4ª Edição. São Paulo: Editora Makron, McGraw-Hill, p.377. 1991.

KLAR, E.; FESKO, J.W. **Gas and Water Atomization, in: W. Klar (Ed.), Metal Handbook**. vol. 7, 9ª Edição. Ohio: American Society for Metals Park, p. 25-39. 1984.

LIMA, E. R. V. S. **Sinterização de compósitos de Ni/SiC a partir de NiO**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de materiais – Centro de Ciências Exatas e da Terra), UFRN. Natal, p. 103. 2018.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração de produção e operações**. Edição. Especial Anhanguera. São Paulo: Saraiva, p. 562. 2011.

METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. **MPIF Standard 35 - Materials Standards for PM Structural Parts**. 15ª Edição, 2012.

METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. **MPIF Standard 41 - Determination of Transverse Rupture Strength of Powder Metallurgy (PM) Materials**. 6ª Edição, 2008.

METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. **MPIF Standard 42 - Method for Determination of Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products**. 4ª Edição, 2008.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 8ª Edição. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., p. 757. 2012.

PEARSON, E.do B. **Gestão da Qualidade**. 1ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, p.284. 2010.

RAGUSA, A. **Managerial Pillars Workshop**: Training Material Marelli WCM Development Center. 1ª Edição, Minas Gerais: Fiat, 2012.

REIS, A. C. F. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas da matriz metálica 25% Fe-50% Cu-25% Nb em função das temperaturas de sinterização por prensagem a quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de materiais – Rede Temática em Engenharia de Materiais), UFOP. Ouro Preto, p. 111. 2018.

RODRIGUES, D.M. **Otimização Multiobjetivo em Problemas de Delineamento de Experimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Gestão e Otimização), UNESP. Guaratinguetá, p. 95. 2016.

ROLL, K. H. **History of Powder Metallurgy, Metals Handbook**. 9ª Edição -Vol. 7. Powder Metallurgy. p.14-24. 1984.

SCHONBERGER R. J. **Técnicas Industriais Japonesas- Nove Lições Ocultas Sobre a Simplicidade**. 2ª Edição. São Paulo: Pioneira, p. 309. 1984.

SCHONBERGER, R. J. **Fabricação Classe Mundial: As lições de simplicidade aplicadas**. 1ª Edição. São Paulo: Pioneira, p. 263. 1986.

SILVA, W. R. F.; FONSECA, J. M. **Utilizando uma balança digital de baixo custo como densímetro e sua aplicação a sólidos e líquidos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 43 p. e20200364-2 - E20200364-6, 2021.

YAMASHINA, H. **Challenge to Word-Class Manufacturing**. International Journal of Quality & Reliability Management. v. 17, n. 2, p. 132-143, 2000.