

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ALBARI WIERTEL JUNIOR**

**REDUÇÃO DE CUSTOS DA MANUTENÇÃO UTILIZANDO A METODOLOGIA  
*WORLD CLASS MANUFACTURING*: UM ESTUDO DE CASO**

**PATO BRANCO**

**2023**

**ALBARI WIERTEL JUNIOR**

**REDUÇÃO DE CUSTOS DA MANUTENÇÃO UTILIZANDO A METODOLOGIA  
*WORLD CLASS MANUFACTURING*: UM ESTUDO DE CASO**

**Maintenance cost reduction using the world class manufacturing methology: a  
case study.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Dalmarino Setti

**PATO BRANCO**

**2023**



4.0 Internacional

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ALBARI WIERTEL JUNIOR**

**REDUÇÃO DE CUSTOS DA MANUTENÇÃO UTILIZANDO A METODOLOGIA  
*WORLD CLASS MANUFACTURING*: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

14 de junho de 2013

---

Silvana Patricia Verona  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Maria Nalu Verona  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Dalmarino Setti  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PATO BRANCO**

**2023**

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que me auxiliaram durante toda minha trajetória na faculdade, arcando com meus custos para realizar o meu sonho de se tornar engenheiro mecânico e aos servidores da instituição, principalmente aos professores que me alimentaram de inspiração para tornar meu sonho uma realidade.

## EPÍGRAFE

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”

*Albert Einstein*

“Não deve haver limites para o esforço humano. Somos todos diferentes. Por pior do que a vida possa parecer, sempre há algo que podemos fazer em que podemos obter sucesso. Enquanto houver vida, haverá esperança”

*Stephen Hawking*

## RESUMO

O dia a dia do planejamento da manutenção é cheio de rotinas de trabalho e fluxos a seguir. É necessário seguir uma metodologia para orientar e gerenciar os recursos. A metodologia WCM (*WORLD CLASS MANUFACTURING*) orienta quais são os passos necessários para seguir com o objetivo de reduzir os custos de produção, minimizar as perdas e aumentar a confiabilidade dos equipamentos. No pilar de manutenção profissional esses passos são fundamentais para diminuir as quebras de equipamento, aumentar a vida útil dos componentes e reduzir os custos de manutenção. Sendo dividido em 7 passos, sendo os três primeiros passos considerado uma ação reativa, o quarto e o quinto uma ação preventiva e o sexto e o sétimo uma ação proativa. O estudo de caso é um trabalho realizado especificamente no passo 4 de manutenção profissional, onde procurou-se utilizar conceitos da engenharia reversa para aumentar a vida útil de um componente crítico para o processo de injeção de poliuretano. Este trabalho tem como objetivo aplicar na prática um estudo de caso para demonstrar a redução de custos da manutenção preventiva aplicando a metodologia WCM, em uma empresa de eletrodomésticos. Foi selecionado um equipamento através da priorização de custos e através do seu plano de manutenção preventiva foi encontrado o componente que demanda maiores reparos da manutenção. Aplicando os conceitos de engenharia reversa, foi analisado as propriedades mecânicas do componente importado do fabricante, encontrando assim o material adequado para aplicação no processo. O material encontrado foi o aço DIN 41CrAlMo7 conhecido como aço Nitralloy 135M. Não sendo comercializado no Brasil, foi realizado uma seleção de materiais para encontrar outro material similar ao original. Encontrado assim o aço SAE 8550 que possui elementos de liga similar ao aço original. Material que segundo a análise bibliográfica é possível de se aplicar os mesmos processos de fabricação e assim atingir as mesmas propriedades mecânicas do componente original. Dessa forma, foi possível reduzir os custos de manutenção preventiva desse equipamento em R\$ 32.064,00 ao ano, se mostrando satisfatória a aplicação da metodologia na empresa.

Palavras-chave: Manufatura de classe mundial; Manutenção industrial; Redução de custos; Injeção de poliuretano.

## ABSTRACT

The day-to-day maintenance planning is full of work routines and flows to follow. It is necessary to follow a methodology to guide and manage the resources. The WCM (WORLD CLASS MANUFACTURING) methodology guides the necessary steps to follow in order to reduce production costs, minimize losses and increase equipment reliability. No pillar of professional maintenance, these steps are key to reducing equipment breakdowns, increasing component life and reducing maintenance costs. Being divided into 7 steps, the first three steps being considered a reactive action, the fourth and fifth a preventive action and the sixth and seventh a proactive action. The case study is a work carried out specifically in step 4 of professional maintenance, where reverse engineering concepts were used to increase the useful life of a critical component for the polyurethane injection process. This work aims to apply in practice a case study to demonstrate the reduction of preventive maintenance costs by applying the WCM methodology, in an appliance company. An equipment was selected by prioritizing costs and through its preventive maintenance plan the component that requires major maintenance repairs was found. Applying the concepts of reverse engineering, the mechanical properties of the component imported from the manufacturer were analyzed, thus finding the appropriate material for application in the process. The material found was DIN 41CrAlMo7 steel known as Nitralloy 135M steel. Not being marketed in Brazil, a selection of materials was carried out to find other material similar to the original. This is how SAE 8550 steel is found, which has alloying elements similar to the original steel. Material that, according to the bibliographical analysis, it is possible to apply the same manufacturing processes and thus achieve the same mechanical properties of the original component. In this way, it was possible to reduce the costs of preventive maintenance of this equipment by R\$ 32,064.00 per year, proving to be satisfactory the application of the methodology in the company.

Key Words: World Class Manufacturing; Industrial maintenance; Cost saving; Polyurethane injection.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Templo da metodologia WCM. ....	18
Figura 2 - 7 Passos do pilar de Cost Deployment .....	21
Figura 3 - Tipos de manutenção na metodologia WCM. ....	24
Figura 4 - Manutenção por quebra.....	25
Figura 5 - Manutenção baseada no tempo.....	26
Figura 6 - Manutenção via análise por condição.....	27
Figura 7 - Tipos de manutenção vs vida útil do componente .....	28
Figura 8 - 7 Passos da implementação do pilar PM .....	29
Figura 9 - Tipologia causa raiz.....	33
Figura 10 - Machine Ledger - Cabeçalho.....	35
Figura 11 - Machine Ledger - Calendário .....	35
Figura 12 - Estabilização do MTBF .....	36
Figura 13 - Fluxograma do processo de engenharia direta.....	39
Figura 14 - Fluxograma do processo de engenharia reversa.....	39
Figura 15 - Vista explodida dos componentes da parafusadeira modelo MXT-0111 .....	42
Figura 16 - Contribuição das características da expansão .....	45
Figura 17 - Cabeçote de mistura.....	47
Figura 18 - Sistema de produção em serie.....	48
Figura 19 - Ponto de injeção no gabinete.....	48
Figura 20 - Haste raspadora original do equipamento.....	49
Figura 21 - Bico modelo D, 2 seções.....	49
Figura 22 - Fluxograma das etapas .....	50
Figura 23 - Amostras para ensaio.....	51
Figura 24 - Matriz C 2022.12 (Gastos com manutenção preventiva).....	54
Figura 25 - Matriz C 2022.06 (Gastos com manutenção preventiva).....	54
Figura 26 - Injeção de Gabinetes - L02F03.....	55
Figura 27 - Haste raspadora do cabeçote modelo E.....	57
Figura 28 - Antes e depois do desgastada.....	57
Figura 29 - Medição da vida útil do componente.....	58
Figura 30 - Contaminação da espuma de poliuretano no componente.....	58
Figura 31 - Haste raspadora modelo E.....	59
Figura 32 - Haste modelo E, subdivida.....	59
Figura 33 - Valor obtidos no perfil de microdureza Vickers .....	61
Figura 34 - Amostra E, aumento 100x (a) e aumento 500x (b).....	62
Figura 35 - Amostra F, aumento 100x (a) e aumento 500x (b).....	63
Figura 36 - Influência dos elementos de liga na dureza da camada (a) e na profundidade da camada (b). ....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das propriedades térmicas.....	44
Tabela 2 - Identificação das amostras.....	51
Tabela 3 - Quadro Kankan resumido do controle preventivo dos cabeçotes....	56
Tabela 4 - Composição química das amostras E e F.....	60
Tabela 5 - Composição química Aço DIN 41CrAlMo7 (% peso).....	61
Tabela 6 - MEV e EDS na camada de superfície.....	62
Tabela 7 - Família de aços para nitretação.....	64
Tabela 8 – Comparação entre os aços DIN 41CrAlMo7 / DIN 34CrAlNi7-10 / SAE 8550 (% peso).....	65
Tabela 9 - Orçamento dos componentes do cabeçote modelo E.....	66
Tabela 10 - Custo do investimento.....	66
Tabela 11 - Custos manutenção preventiva atual.....	66
Tabela 12 - Custos manutenção preventiva após aplicação do projeto.....	67
Tabela 13 - Cálculo custo/benefício no 1º ano.....	67
Tabela 14 - Cálculo custo/benefício a partir do 2º ano.....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Autonomous Activites
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
AEA	Agente de expansão auxiliar
AM	Autonomous Maintenance
AM	Autonomous Maintenance
B/C	Benefit/Cost
BM	Breakdown Maintenance
BOM	Bill of Materials
CAD	Computer-Aided Design
CBM	Condition Based Maintenance
CC	Conversion Cost
CD	Cost deployment
EC	Engenharia Convencional
EDS	Espectroscopia por dispersão de elétrons
EMM	Early Equipament Managment
ENV	Environment
ER	Engenharia Reversa
EWO	Emergency Work Order
FI	Focused Improvement
HBM	Hour Based Maintenance
HIPS	High Impact Polystyrene
IR	Inspection Repair
JIT	Just in time
KAI	Key Activity Indicador
KPI	Key Performance Indicator
LOG	Logistics
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MDI	Metileno Difenil Isocianato
MTBF	Mean time between failures
MTTF	Mean time to failure
MTTR	Mean time to repair
OEE	Overall Equipament Effectiveness
OEE	Overall Equipament Effectiveness
OLE	Overall Logistics Effeciency
OP	Opportunity loss
PD	People Development
PDCA	Plan Do Check Action
PM	Professional Maintenance
PPM	Partes por milhão

PU	Poliuretano
PUR	Poliuretano Rígido
QC	Quality Control
RSA	Royal Swedish Academy of Engineering Sciences
SAF	Safety
SMP	Standard Maintenance Procedures
TBM	Time Based Maintenance
TDI	Tolueno Diisocianato
TIE	Total Industrial engineering
TPM	Total Productive Maintenance
TQC	Total Quality Control
WCM	World Class Manufacturing
WO	Workplace Organization

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>14</b>
1.2.1 Objetivo principal .....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
<b>1.3 Justificativa</b> .....	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Metodologia da manufatura de classe mundial</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3 O pilar CD (<i>Cost Deployment</i>)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.4 O pilar PM (<i>Professional Maintenance</i>)</b> .....	<b>24</b>
2.4.1 Os tipos de manutenção na metodologia WCM .....	24
2.4.2 Os sete passos do pilar PM.....	28
<b>2.5 O conceito da engenharia reversa</b> .....	<b>37</b>
<b>2.6 Aplicações da engenharia reversa</b> .....	<b>39</b>
<b>2.7 Etapas do processo da engenharia reversa</b> .....	<b>41</b>
<b>2.8 Poliuretano rígido</b> .....	<b>43</b>
<b>2.9 Processo de produção do poliuretano rígido</b> .....	<b>45</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>49</b>
<b>3.1 Materiais</b> .....	<b>49</b>
<b>3.2 Métodos</b> .....	<b>49</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>54</b>
<b>4.1 Priorização do equipamento.</b> .....	<b>54</b>
<b>4.2 Priorização do componente</b> .....	<b>55</b>
<b>4.3 O componente</b> .....	<b>56</b>
<b>4.4 Geometria e estrutura</b> .....	<b>58</b>
<b>4.5 Composição química</b> .....	<b>60</b>
<b>4.6 Micro dureza vickers</b> .....	<b>61</b>

<b>4.7 Resultados da análise MEV e EDS.....</b>	<b>61</b>
<b>4.8 Análise metalográfica .....</b>	<b>62</b>
<b>4.9 Seleção do material.....</b>	<b>63</b>
<b>4.10 Investimento .....</b>	<b>65</b>
<b>4.11 Benefício .....</b>	<b>66</b>
<b>4.12 Custo/Benefício .....</b>	<b>67</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manutenção vem se beneficiando de diversas formas no ramo da tecnologia dos processos. A utilização de ferramentas de gestão moderna e sistema de sensoriamentos cada vez mais robustos tem proporcionado alto nível de competitividade no mercado, empresas que adotam essas tecnologias conseguem entregar alta disponibilidade dos equipamentos com baixo custo de manutenção, tendo assim, um custo de produção reduzido com a possibilidade colocar produtos tecnológicos no mercado com baixo custo de produção. (OTANI e MACHADO, 2008)

A revolução do mundo fabril atual é a busca por padronização, gerenciamento de indicadores, ferramentas para gestão de custos e estratégias de investimento para médio a longo prazo. Com o intuito de garantir a produtividade dos seus ativos, várias empresas estão adotando técnicas de manutenção preditiva, sistemas de coleta de dados e engenharia reversa para melhorar a prática da manutenção industrial. A manutenção é um custo fixo para manter os ativos produzindo, por isso, do ponto de vista econômico é um ponto estratégico. (OTANI e MACHADO, 2008)

No processo produtivo é comum que existam perdas e aumentem consequentemente os custos de produção ao longo do tempo, diminuindo os lucros da companhia. Assim como os ser humano envelhece as máquinas também tem sua depreciação. Não é saudável para a competitividade da empresa manter o custo de transformação de seus produtos alto, existe sempre a constante procura pela melhoria. Por isso é necessária a aplicação e monitoramento da manufatura para atingir o objetivo de produzir com alto nível de qualidade e com o custo de transformação minimizado. (YAMASHINA, 2000)

A procura de melhorias exige a aplicação de ferramentas para sistematizar a manufatura, padronizar os meios de produção e gestão das equipes. Nesse âmbito, surge a metodologia de classe mundial buscando combater os defeitos de produção simplificando a manufatura para enxergarmos através de indicadores e matrizes de priorização a oportunidade de melhoria. (YAMASHINA, 2000)

O trabalho utilizou as ferramentas da metodologia WCM (World Class Manufacturing) seguindo o passo a passo do pilar de manutenção profissional. É focado na aplicação um projeto para minimizar os custos de manutenção preventiva de um equipamento especificamente no passo 4, seguindo a priorização da metodologia. Para isso fez se o uso de conceitos da engenharia reversa para buscar

as melhores propriedades mecânicas de um componente já conhecido. Para replicarmos as características do melhor fornecedor para as outras peças mais frágeis, buscando assim um aumento de vida útil do componente para reduzir a longo prazo os custos de manutenção preventiva.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo principal**

O objetivo deste trabalho é aplicar os conceitos da metodologia WCM (*World Class Manufacturing*) dentro de uma fábrica de refrigeradores localizada na cidade de Joinville/SC para reduzir os custos de manutenção preventiva de um equipamento selecionado através da priorização da matriz de desdobramento de custos.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Utilizar a matriz de desdobramento de custos para identificar os equipamentos da área de montagem com maior custo preventivo, selecionando o equipamento com maior impacto;

Avaliar o plano preventivo do equipamento e estratificar o equipamento a nível componente;

Selecionar um componente de maior impacto no plano preventivo;

Desenvolver através da engenharia reversa um modelo CAD 3D do componente;

Sugerir uma melhoria para redução dos custos de manutenção preventiva através do aumento da vida útil do componente conforme a metodologia WCM e conceitos de engenharia reversa;

Avaliar a viabilidade econômica de aplicação do projeto;

## **1.3 Justificativa**

A manutenção preventiva tem por objetivo realizar a troca de um componente baseado no tempo de uso, para que o componente não venha ocasionar uma falha no equipamento. Existem situações que o componente não chegou no fim de sua vida útil, mesmo assim é realizado a troca para evitar probabilidade de falha do equipamento sem ocasionar uma parada da produção inesperada. A manutenção

preventiva, portanto, exige um custo fixo anual para cada equipamento. As peças de reposição precisam estar estocadas e próximas do equipamento caso o plano preventivo exija uma troca. A metodologia de classe mundial auxilia a manufatura enxergar os passos da aplicação de uma boa gestão de recursos e um planejamento focado na redução de custos. Seguindo os passos de cada área da manufatura é possível encontrar oportunidades para redução de custos. Especificamente no pilar de manutenção industrial a metodologia WCM ensina que o equipamento deve ser dividido em conjunto, subconjunto e componente. Estratificando o equipamento a nível componente é possível aplicar uma gestão de manutenção preventiva focada em pontos que sejam críticos e que ocasionam a parada do equipamento. Especificamente no quarto passo do pilar de manutenção industrial, a metodologia permite que os profissionais estudem os componentes para aumentar sua vida útil e consequentemente reduzir a frequência de manutenção diminuindo seus custos preventivos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Metodologia da manufatura de classe mundial

As grandes empresas vêm buscando reduzir seus custos de manufatura com estratégias e metodologias para melhorar sua competitividade. Neste contexto, o WCM (*World Class Manufacturing*) é uma metodologia aplicada na manufatura para melhorar produtos e processos. Evitando desperdícios e reduzindo custos da companhia. Em 2005 Dr. Hajime Yamashina, professor Emérito da Universidade de Kyoto e membro da RSA (Royal Swedish Academy of Engineering Sciences), desenvolveu junto a companhia FIAT a metodologia WCM. Uma metodologia voltada para gestão com foco na eliminação de perdas e eficiência na maximização da produtividade da empresa e qualidade dos produtos. (GONÇALVES, GUIMARÃES e BAGNO, 2014)

Em toda manufatura por mais bem planejada que tenha sido, sempre vão existir oportunidades de melhorias. Sendo este, um dos pilares da norma de gestão da qualidade NBR ISO 9001, nomeada como Kaizen, melhoria contínua. (NBR ISO 9001:2008). Uma sugestão de melhoria pode surgir de qualquer um que está inserido no meio fabril. Seja a engenharia de produção, a manutenção profissional ou até mesmo do operador do equipamento. Isso agrega valor ao produto, sempre em busca da perfeição. (SHINGO, 1996)

A metodologia WCM busca envolver todas as pessoas, de todos os níveis, no dia a dia das atividades de rotina WCM. Devendo existir rigor na aplicação das ferramentas e instrumentos, padronizando e difundindo o conhecimento entre todos para que os resultados sejam alcançados. (BORGES e OLIVEIRA, 2015)

Para o Dr. Hajime Yamashina um dos principais difusores do WCM no Brasil e no mundo: “*O sistema é muito simples, precisamos identificar qual é o problema, a sua perda, o método a ser adotado e depois controlar os resultados [...]*”. (YAMASHINA, 2000). A metodologia WCM é base de conceitos já existentes, dentre eles estão: o *Just in time* (JIT), *Total Quality Control* (TQC), *Total Productive Maintenance* (TPM) e *Total Industrial engineering* (TIE) com um diferencial de trabalhar todas essas ferramentas envolvendo custos. Abaixo serão descritas um breve resumo de cada ferramenta que compõe a metodologia WCM.

O TQC segundo (CAMPOS, 2004) tem como base a participação de todos os empregados e níveis hierárquicos da empresa para o sucesso da aplicação da ferramenta. É necessário traçar objetivos para qualidade, custo e segurança e assim garantir a satisfação dos consumidores. Para encontrar um objetivo primeiramente é necessário procurar entender através de indicadores como está o cenário atual da manufatura. Caso o valor do indicador não seja alcançado, é preciso entender a causa do problema e desenvolver um plano de ação para melhorar o indicador.

O sistema JIT segundo (VOSS, 1987) busca eliminar os desperdícios da fabricação para aprimorar a produtividade. Objetivo é simplificar a quantidade de material necessária para atender a capacidade produtiva com a mínima quantidade de componentes, mínimo espaço de armazenamento, mínima instalação e mínima quantidade de recursos humanos. Para atingir o sucesso desse trabalho é necessário o engajamento de todos os setores da fabricação a flexibilidade dos fornecedores e funcionários junto com a confiabilidade na entrega.

Segundo (MIRSHAWKA e OLMEDO, 1994) TPM deve envolver todos os empregados da fábrica. Desde nível gerencial até nível operador. Os objetivos dessa metodologia são: Incentivar o trabalho em equipe entre os funcionários, garantir a entrega e eficiência dos equipamentos, implementar um plano sólido de manutenção para aumentar a vida útil dos equipamentos e engajar todos os setores da produção para alavancar a produção. Mas para (CORRÊA e CORRÊA, 2008) o principal objetivo do TPM é engajar os operadores das máquinas para realizar uma manutenção autônoma. Com isso, os operadores são responsáveis pela condição de seus equipamentos, limpeza e organização. Contudo é de responsabilidade da manutenção estabelecer os procedimentos e treinamentos para o operador executar a tarefa.

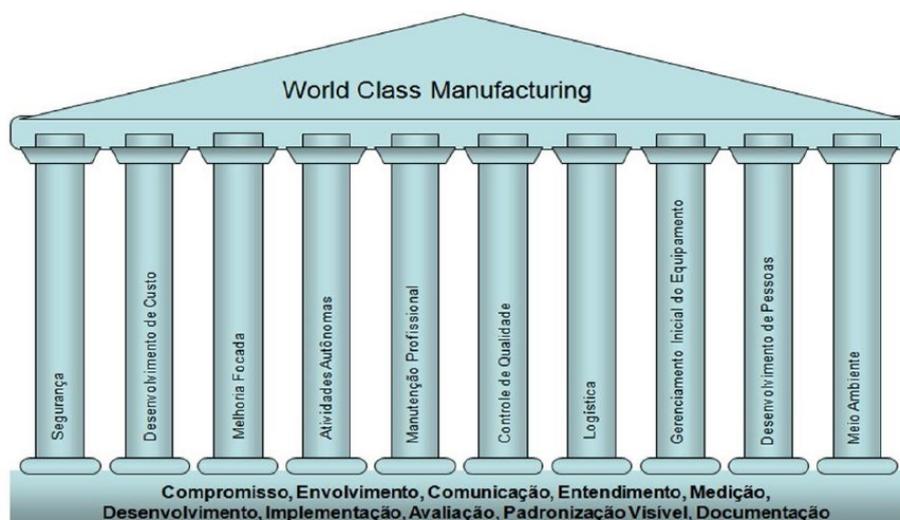
Para (PADDOCK, 1993), o objetivo principal do TIE é o zero desperdício e a busca para reduzir estoques evitando a obsolescência dos componentes. Essa metodologia aborda todos os problemas de produção buscando melhoria continua no processo. Para isso a engenharia industrial trabalha em cima das perdas e erros de produção buscando aumentar a confiabilidade dos equipamentos.

A metodologia WCM portanto engloba um pouco de cada uma dessas metodologias e suas características citadas acima conta com um grande diferencial que é o gerenciamento total dos custos. O pilar de CD (*Cost deployment*) é responsável por converter todas as perdas e desperdícios em custos com isso,

consegue analisar a efetividade de cada projeto aplicado para redução de custos. (YAMASHINA, 2000)

A figura 1 traz o que o professor Yamashina chama de templo do WCM. A metodologia é sustentada por dez pilares técnicos.

**Figura 1 - Templo da metodologia WCM.**



**Fonte: Adaptado de Yamashina (2000)**

O primeiro pilar abreviado como SAF (*Safety* - Segurança) tem como objetivo reduzir o número de acidentes, desenvolver uma cultura de segurança proativa, melhorar a ergonomia do local de trabalho e atender os requisitos mínimos para garantir a segurança dos operadores. Para isso, o time de segurança faz auditorias internas periódicas para avaliar riscos, faz treinamentos de segurança e melhorias técnicas nos equipamentos. Com isso conseguem reduzir as condições inseguras que resultarão em menos acidentes. (YAMASHINA, 2000)

O segundo pilar chamado de manutenção industrial, ou abreviado como PM (*Professional Maintenance* – Manutenção profissional) será apresentado com mais detalhes na próxima sessão 2.4.

O terceiro pilar chamado de melhoria focada, ou abreviado como FI (*Focused Improvement*) tem como objetivo principal eliminar os principais desperdícios e perdas identificadas por CD para evitar a dedicação e empenho dos recursos em problemas que não são prioridade. Construir conhecimento técnico para atacar perdas específicas. (YAMASHINA, 2000)

O quarto pilar chamado de atividades autônomas, ou abreviado como AA (*Autonomous Activites*) é dividido em organização do posto de trabalho WO (*Workplace Organization*) focado em regiões da fábrica que exige bastante mão de obra como por exemplo linhas de montagem e AM (*Autonomous Maintenance*) onde o objetivo é prevenir degradação acelerada cuja causa raiz é falta de condições básicas de operação como por exemplo limpeza, organização, procedimentos de setup e parâmetros de operação. (YAMASHINA, 2000)

O sexto pila chamado de controle de qualidade, abreviado como QC (*Quality Control*) tem como objetivo eliminar as perdas de qualidade e diminuir o retrabalho das peças. Este pilar trabalha para garantir a qualidade dos produtos finais, e garantir a satisfação do consumidor, atuando na conscientização dos operadores a buscar zero defeitos. (YAMASHINA, 2000)

O sétimo pilar chamado de logística interna, abreviado como LOG (*Logistics*) é o responsável por suprir a demanda de componentes das linhas de montagem, com o mínimo de estoque possível, no tempo correto e na quantidade correto. Garantindo assim um custo de armazenamento reduzido. (YAMASHINA, 2000)

O oitavo pilar chamado de gerenciamento inicial do equipamento abreviado como EMM (*Early Equipament Managment*), tem responsabilidade de adquirir equipamentos novos, com uma qualidade superior aos já instalados na fábrica. Desenvolvendo atividades com os pilares de manutenção autônoma e manutenção profissional para garantir os padrões de instalação e garantir que pontos frágeis detectados sejam corrigidos, garantindo assim a vida útil do equipamento. (YAMASHINA, 2000)

O nono pilar chamado de desenvolvimento de pessoas, abreviado como PD (*People Development*) é responsável por manter os profissionais motivados, procurando desenvolve-los através de treinamentos para diminuir a negligência humana e aumentar a segurança de trabalho diminuindo os atos inseguros. (YAMASHINA, 2000)

O décimo e ultimo pilar chamado de meio ambiente, abreviado como ENV (*Environment*) é responsável por executar melhorias no meio ambiente da empresa, especificamente com redução de consumo energético, uso de energias alternativas, promovendo a conscientização ambiental. (YAMASHINA, 2000).

Todos os pilares são gerenciados por um líder e cada pilar envolve desde os diretores da empresa até as pessoas de chão de fábrica. Sendo que cada pilar tem 7

passos rigorosamente a seguir, para atingir o objetivo final de zero quebras, zero defeitos e zero desperdício.

### **2.3 O pilar CD (*Cost Deployment*)**

O segundo pilar chamado desenvolvimento de custos ou abreviado como CD é o maior diferencial da metodologia WCM. Ele é responsável por nortear os demais pilares através da transformação das perdas em custos. Por exemplo deve-se levar em conta: retrabalho, refugo, falta de material, hora de máquina parada, mão de obra de manutenção, reposição de peças, mão de obra operacional.

Calculado a transformação da manufatura é possível priorizar as áreas ou máquinas para concentrar os esforços em projetos que podem trazer maior retorno financeiro pra empresa. Contudo, é necessário calcular-se o B/C (*Benefit/Cost*) estimado para avaliar se a aplicação do projeto vale a pena para empresa. Além do direcionamento, é de responsabilidade do pilar acompanhar a performance da aplicação do projeto.

O custo deve levar em conta todo o tipo de recurso que foi desperdiçado. Por exemplo, um equipamento parado na linha de produção, teve recurso operacional dispersado devido o operador ter ficado ocioso. Se esta linha de produção for interligada a outros processos, todos os operadores seguintes também ficaram parados. Além do custo da mão de obra necessária para retornar o bom funcionamento dos equipamentos, também temos o valor das peças substituídas caso exista a quebra ou desgaste de um componente que provoca um mal funcionamento do equipamento. (YAMASHINA, 2000)

Estabelecido que os custos são calculados semestralmente. Dependendo a empresa, pode ser feito anualmente. Com o custo das perdas transformado, é necessário no primeiro momento classificar os equipamentos entre AA, A, B e C. De acordo com a metodologia WCM, os equipamentos AA totalizam 50% de todas das perdas e as outras categorias representam 20%, 20% e 10% respectivamente. Os 7 passos do pilar CD estão ilustrados na figura 2.

**Figura 2 - 7 Passos do pilar de Cost Deployment**



**Fonte: Adaptado de Yamashina (2000)**

O primeiro passo é considerado fundamental pois é necessário o envolvimento com o departamento da controladoria industrial, para que os custos sejam estratificados a nível de despesas operacionais e áreas da fábrica. Traçar um objetivo também faz parte do primeiro passo, e o objetivo de redução são definidos entre 6% à 10% dependendo dos custos de conversão do ano anterior analisado. As despesas operacionais podem ser classificadas em mão de obra direta, mão de obra indireta, materiais consumíveis, energia elétrica dentre outros.

O segundo passo é a criação da matriz A, onde leva em consideração as perdas e desperdícios nas linhas de produção que devem ser definidas e classificadas em três classes, são elas: equipamento, mão de obra e material. Em equipamento podemos classificar as perdas em quatro categorias: disponibilidade, desempenho, qualidade e disponibilidade teórica. As três primeiras categorias podem ser representadas por um indicador conhecido como OEE (*Overall Equipment Effectiveness* – Eficiência global do equipamento) sendo a multiplicação dos índices de disponibilidade, performance e qualidade dado em porcentagem. O último índice são perdas que não entram no cálculo do OEE.

$$OEE = Disponibilidade [\%] \times Performance[\%] \times Qualidade[\%] \quad (1)$$

Dado que a disponibilidade pode ser calculada através da equação 2:

$$D = \frac{\text{Tempo disponível do equipamento [hrs]}}{\text{Tempo total [hrs]}} \quad (2)$$

Dado que a performance do equipamento pode ser calculada pela equação (3):

$$P = \frac{\text{Ciclo teórico [s]} \times \text{Quantidade de peças}}{\text{Tempo de operação [s]}} \quad (3)$$

Dado que a qualidade pode-se calcular através da equação (4):

$$Q = \frac{\text{Número de peças da produção total} - \text{Número de refugos e retrabalhos}}{\text{Número de peças da produção total}} \quad (4)$$

A próxima classificação de perda é mão de obra que é dividida em 4 categorias de perda: gestão de organização dos operadores, movimentos operacionais, organização da linha de produção e má qualidade do produto devido ao erro humano.

Por último as perdas derivadas de material são agrupadas em 3 categorias sendo elas: utilização inadequada do material, má utilização da energia e substituição das peças devido a manutenção.

O terceiro passo é a construção da matriz B que diferencia as perdas entre causal e resultante. Dentre todas as perdas inseridas na matriz A, relativamente com alto custo agregado de transformação, devem ser estratificadas entre causais ou resultantes. Interpreta-se perda causal como por exemplo: problema de processo ocasionado por equipamento, operador ou má qualidade material. Perda resultante são: perdas consequentes de avarias do equipamento, mão de obra ociosa devido parada de linha.

O quarto passo é a construção da matriz C onde os custos das perdas são calculados. Todas as perdas consideradas são divididas em estações e equipamentos utilizando parâmetros financeiros para podermos comparar processos diferentes

através de uma unidade de medida. São considerados custo da hora de mão de obra, custo de hora de energia, custo hora da linha parada. Assim é possível a construção de gráficos com a classificação das áreas e equipamentos que trazem maior desperdício para a empresa e assim os projetos de redução de custo podem ser selecionados de acordo com o método lógico de priorização para garantir que recursos não serão desperdiçados em projetos que não trarão retorno para empresa.

O quinto passo é a construção da matriz D pois já tendo em visto que as perdas são conhecidas, é preciso portanto definir o método ideal para cada projeto de redução. Existem dois tipos: o método focado e a abordagem sistemática. No método focado a ideia é obter resultados em curto prazo com metodologias mais simples de solucionar problemas. A abordagem sistemática gera resultados a médio e longo prazo, sendo ferramentas que requerem um tempo maior de planejamento do time e podem tratar problemas de caráter geral. Sendo assim a matriz D é o direcionamento para encontrar a melhor metodologia adequada para cada desperdício específico da manufatura. Dentro da matriz D é possível verificar quais são os KPI (*Key Performance Indicator*) que serão impactados pelo projeto. Facilitando assim o rastreo da controladoria para verificar os resultados.

O Sexto passo é a construção da matriz E. Matriz de custo x benefício para cada projeto. Uma vez que já se sabe as datas de aplicação de cada projeto e quais serão as metodologias aplicadas e indicadores atingidos, é possível verificar uma estimativa se o projeto é benéfico financeiramente para a empresa ou não. Todo projeto será válido será executado quando B/C for maior que 1. Projetos abaixo de 1 não podem ser aplicados.

O Último passo é a representação do fluxo de caixa, dado os projetos aplicados em cada área, para contabilizar os ganhos já descontando os custos de implementação. A matriz F mostra cada projeto aplicado e sua liquidez anual.

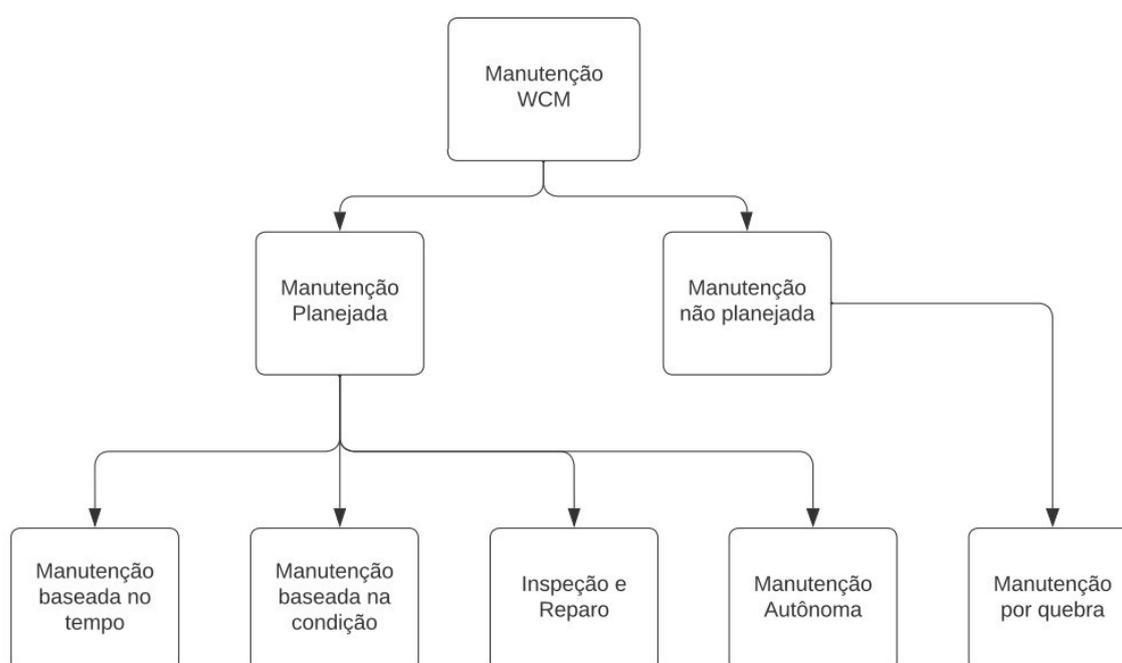
Este trabalho está focado na redução de custos da manutenção. Portanto, será bastante utilizado o gráfico chamado de matriz C desenvolvida no quarto passo do pilar de CD, na qual traz uma classificação de todos os equipamentos da fábrica em ordem decrescente do maior custo para o menor. Dentre esses custos estão os diretos CC (*Conversion Cost* – Custo de conversão), relacionados a quantidade de troca de peças que foi realizada durante um determinado período de tempo. E os indiretos OL (*Opportunity loss*), relacionados a grandes paradas de equipamento, cuja a parada deixou de produzir um determinado número de produtos. (YAMASHINA, 2000)

## 2.4 O pilar PM (*Professional Maintenance*)

### 2.4.1 Os tipos de manutenção na metodologia WCM

A gestão da manutenção ao longo dos tempos tem sofrido bastante alterações, passando por processos de inovação tanto da parte filosófica quanto ao uso de ferramentas e tecnologias, sendo assim a manutenção ainda não é uma regra ou um sistema já consolidado, cada empresa adota sua estratégia de diferentes formas. Os conceitos de manutenção na metodologia WCM estão ilustrados na figura 3, sendo divididos entre manutenção planejada e manutenção não planejada. (SILVA e MEDEIROS, 2014). A manutenção planejada contempla a manutenção baseada no tempo denominada como TBM (*Time Based Maintenance*), a manutenção baseada na condição denominada como CBM (*Condition Based Maintenance*), a inspeção/reparo denominada como IR (*Inspection Repair – Inspeção e reparo*) e a manutenção autônoma denominada como AM (*Autonomous Maintenance*). A manutenção não planejada na metodologia WCM contempla a manutenção por quebra nomeada como BM (*Breakdown Maintenance*).

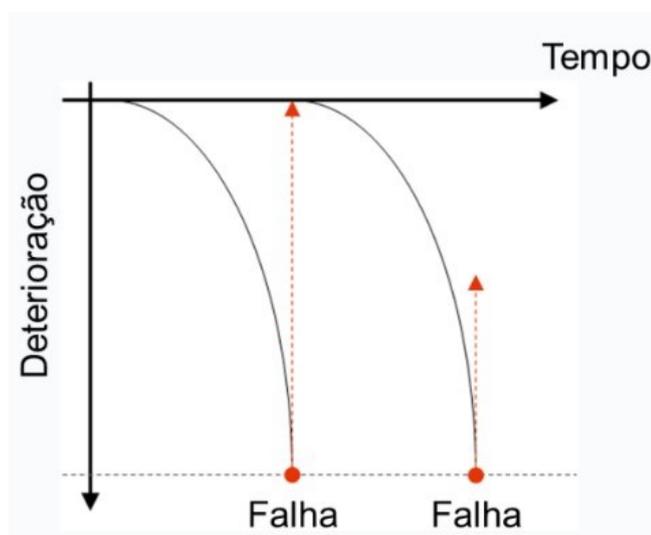
**Figura 3 - Tipos de manutenção na metodologia WCM.**



**Fonte: Adaptado de Yamashina (2000)**

A manutenção corretiva ou manutenção por quebra, categorizada como não planejada, é a ação dos profissionais após a parada de um equipamento devido à quebra de um componente conforme podemos visualizar na figura 4. Deve ser adotada quando a parada do equipamento não impacte na linha de produção, ou seja, insignificante perto dos outros processos. Suas vantagens são: uso total da vida útil do componente, baixo custo se aplicado corretamente, não necessita de planejamento e disponibilidade de peças. Suas desvantagens são: não existe aviso prévio de falha (podendo gerar um potencial risco a segurança do operador), perda de produção inesperada e exige profissionais em plantão. (YAMASHINA, 2000)

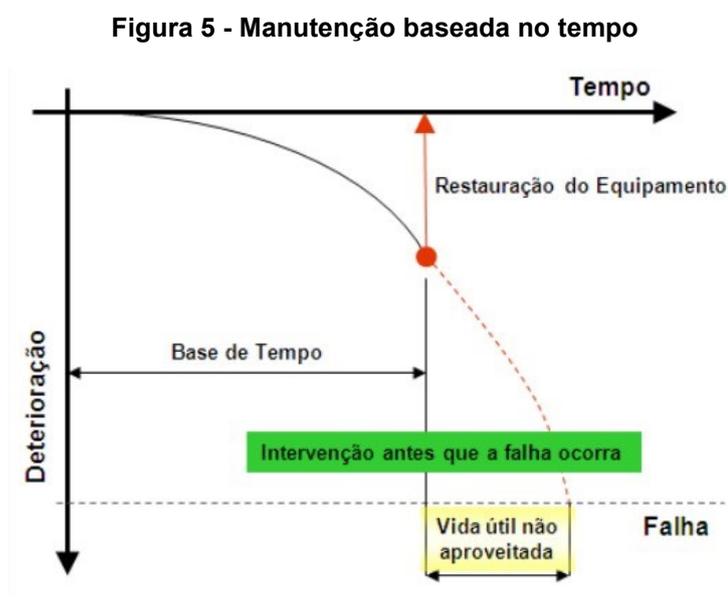
**Figura 4 - Manutenção por quebra**



**Fonte: Adaptado de Yamashina (2000)**

A manutenção baseada no tempo é definida como a troca do componente após um determinado tempo de uso ou a partir de um determinado número de ciclos que o componente aguenta de acordo com o fabricante. Um exemplo clássico é a troca de óleo do motor do automóvel que pode ser executada de acordo com a quilometragem rodada que é em torno de 5.000 a 10.000 km. E no caso do automóvel que não seja muito utilizado recomenda-se a troca do óleo em torno de 6 à 12 meses. É importante consultar com o fabricante de cada equipamento qual é a recomendação da troca do componente, geralmente é possível encontrar essa informação no *DATASHEET* (folha de especificação) do fornecedor. Suas vantagens são: redução do número de falhas, utilização mais eficiente da mão de obra e atividades executadas com recurso planejado (mão de obra e material). Suas desvantagens são o custo elevado para

trocar componentes que não chegaram no fim de sua vida útil, manutenção invasiva ou desnecessária e degradação dos componentes devido uma anomalia adicionada pela mão de obra não qualificada (YAMASHINA, 2000). A figura 5 representa a vida útil não aproveitada na manutenção baseada no tempo.

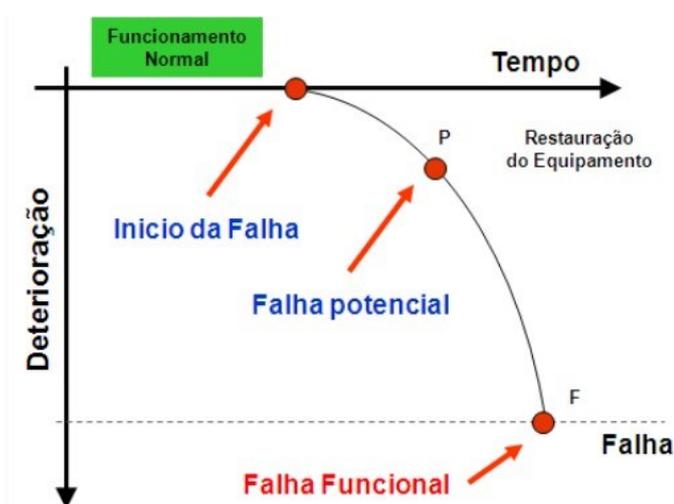


**Fonte: Adaptado de Yamashina (2000)**

A manutenção por condição é um conceito criado entre as décadas de 70 e 80, é nova visão de aplicar uma manutenção preventiva aos equipamentos. Esse método baseia-se nas condições operacionais do equipamento, busca entender quais os parâmetros necessários que cada componente deve desempenhar para um bom funcionamento do equipamento de acordo com (CABRAL, 2006). Seu maior objetivo é diminuir a probabilidade de falha baseada em dados e não em suposições de probabilidade de falha como é na manutenção preventiva. Permitindo uma maior disponibilidade do equipamento para a produção e maximizando a vida útil do componente. (LIMA, LIMA e SALLES, 2006). Com a manutenção CBM é possível entender o estado de saúde de cada componente monitorado, permitindo um planejamento da atividade com maior assertividade na causa raiz do problema. Portanto é necessário ter o acesso a sensores específicos que coletem dados parametrizados para cada tipo de componente. Esses podem ser divididos em 5 categorias, são elas: emissões acústicas e de vibração; emissões térmicas; emissões de fluxo de lubrificante e fluido refrigerante; emissões relativas ao consumo energético

e por último medidas para controlar a qualidade do produto. Podem ser feitas através da aferição com câmera termográfica, análise de vibração com acelerômetros, análise do particulado em PPM (partes por milhão) no óleo ou medidas de tensão, corrente e potência. Sua vantagem é a maximização da vida útil do componente e do equipamento, os recursos para executar a manutenção podem ser programados, peças de reposição podem ser adquiridas na hora exata e possibilita uma previsão da falha (YAMASHINA, 2000). Na figura 6 temos um gráfico que representa a manutenção via análise por condição.

**Figura 6 - Manutenção via análise por condição**



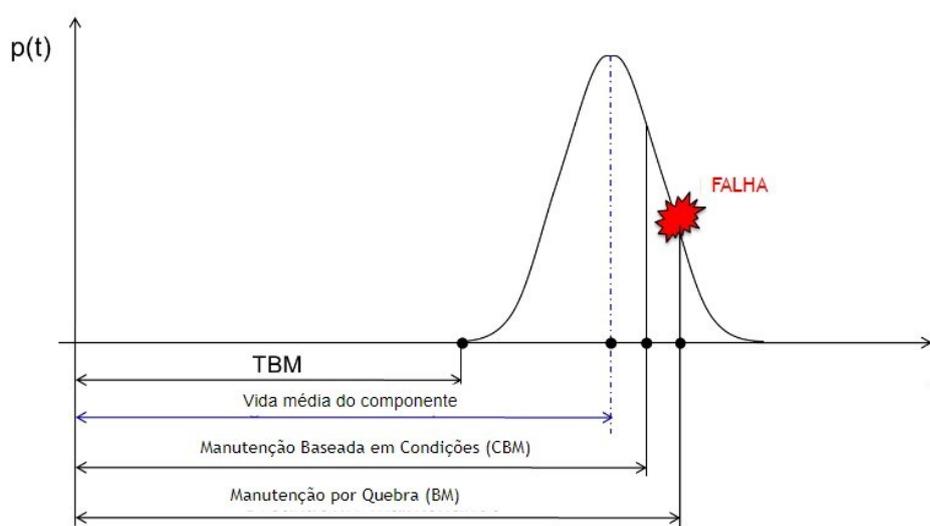
Fonte: Adaptado de Yamashina (2000)

A manutenção por inspeção é o preenchimento de um *checklist* (lista de verificação) estabelecido pelo plano preventivo onde o profissional utilizando seus principais sentidos como visão, olfato, tato e audição consegue determinar a condição de trabalho do componente e realizar a troca caso as condições sejam desfavoráveis para o bom funcionamento do equipamento, como por exemplo a verificação de folgas, trincas, odores não característicos com o processo, excesso ou falta de lubrificação, densidade do óleo. Características que podem ser verificados pelos próprios operadores através dos sentidos. Suas vantagens são: utilização de recurso mais simples e barato do que tecnologias instaladas no equipamento para uma análise em comparação a manutenção por CBM Suas desvantagens são: disponibilizar fácil

acesso ao equipamento para executar as atividades de inspeção. (YAMASHINA, 2000)

Na figura 7 podemos visualizar um gráfico de comparação da vida útil do componente com os diferentes tipos de manutenção adotada pela empresa. Isso permite que a manutenção enxergue qual é a melhor estratégia para executar a manutenção no componente e classifica-lo de acordo com sua necessidade: TBM, CBM, BM ou IR.

**Figura 7 - Tipos de manutenção vs vida útil do componente**



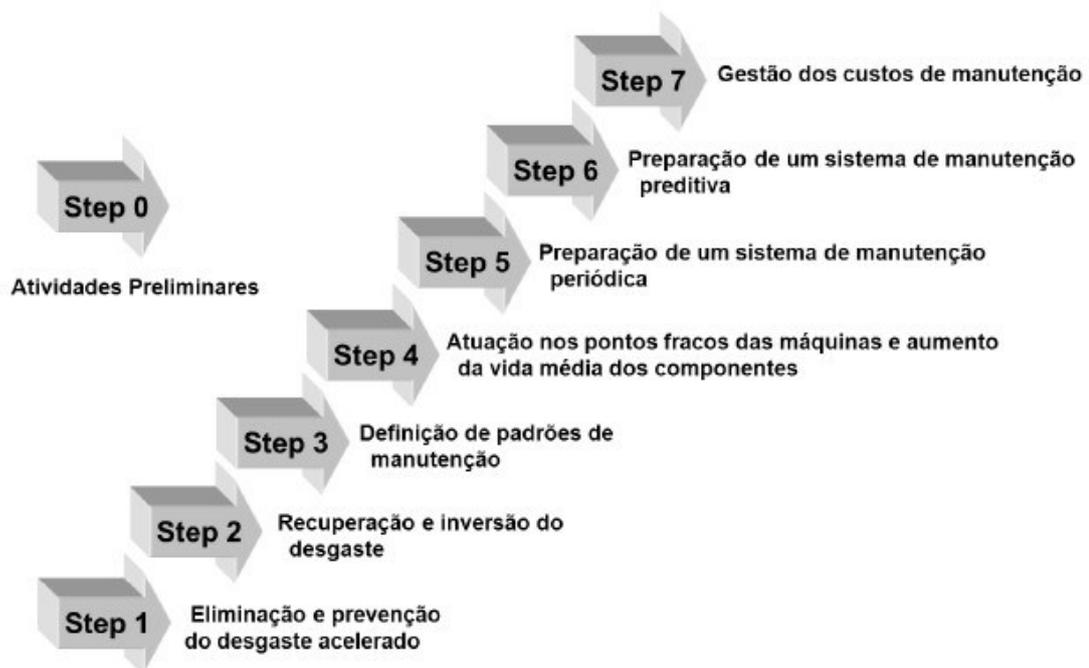
**Fonte: Adaptado de Yamashina (2000)**

#### 2.4.2 Os sete passos do pilar PM

É de responsabilidade do pilar técnico de manutenção profissional eliminar as quebras, maximizar a confiabilidade dos equipamentos, reduzir as micro paradas e obter economias com projetos para aumento da vida útil dos componentes críticos dos processos. A manutenção profissional faz parte dos pilares técnicos responsáveis por aplicar melhorias focadas, buscando boas práticas na manutenção autônoma (AM) e profissional (PM) antecipando as avarias que acontecem no dia a dia com a deterioração natural das máquinas. Trabalhando junto com o pilar de EEM para adquirir equipamentos que estejam dentro dos padrões de componentes já utilizados. Esse objetivo é alcançado através da aplicação dos 7 passos de manutenção profissional. Quando instaurado na empresa a metodologia WCM especificamente no pilar de manutenção profissional, se inicia aplicando os 7 passos da manutenção

profissional em um equipamento modelo no qual possui o maior desdobramento de custos em quebras. A partir daí este equipamento servirá como modelo para a expansão da metodologia nas outras áreas e equipamentos da fábrica, de preferência aqueles categorizados como AA (YAMASHINA, 2000). Na figura 8 podemos visualizar todos os passos para implementação do pilar de manutenção profissional.

**Figura 8 - 7 Passos da implementação do pilar PM**



**Fonte: Adaptado de Yamashina (2000)**

O passo zero, é fundamental pois inicia a metodologia com a criação de padrões para a gestão da manutenção. Propõe a criação de um sistema de recolhimento de dados para mapear e classificar os equipamentos conforme o desdobramento de custos de cada área. É definido através da metodologia WCM os indicadores necessários para monitorar a manutenção profissional. Sendo divididos em KPI (*Key Performance Indicator* – Indicadores chave de desempenho) e KAI (*Key Activity Indicator* – Indicadores chaves de atividade). Os indicadores de performance são: Quantidade de quebras em equipamentos classificados na categoria AA, indicador de tempo médio entre falhas MTBF (*Mean Time Between Failures*), indicador de tempo para reparo de um equipamento MTTR (*Mean Time to Repair*), indicador de eficácia geral da linha OLE (*Overall Logistics Efficiency*) e percentual do custo de redução nos projetos. Os indicadores chave de atividade são: o percentual

das atividades preventivas executadas através do calendário PM, o percentual de equipamentos em expansão, a quantidade criada de procedimentos padrão de manutenção SMP (*Standard Maintenance Procedures*), percentual da eficiência de entrega das ordens de manutenção emergencial EWO (*Emergency Work Order*), percentual do OLE e OEE e por último quantidade de horas transferidas de atividades da manutenção profissional para manutenção autônoma. (YAMASHINA, 2000). Os indicadores são:

O MTBF pode ser calculado através da equação 2:

$$MTBF = \frac{\text{Tempo total disponivel [hrs]} - \text{Tempo total das paradas [hrs]}}{\text{Numero de paradas}} \quad (2)$$

O MTTR pode ser calculado através da equação 3:

$$MTTR = \frac{\text{Tempo para reparo do equipamento [hrs]}}{\text{Numero de paradas}} \quad (3)$$

Segundo (CORRÊA e CORRÊA, 2008), no caso de uma parada corretiva, o tempo MTTR influenciará no tempo médio disponível de máquinas que conseqüentemente influenciará no OEE do equipamento. Ambos estão interligados.

Além de definir os indicadores controláveis pela manutenção é necessário também realizar treinamentos para orientar o time da implementação da nova metodologia, organizar as áreas, organizar as ferramentas, criar uma gestão de lubrificantes, gestão e organização das peças de reposição, organização e divisão dos laboratórios e carrinhos de manutenção. Definem-se os fluxos de trabalho para manutenção corretiva e preventiva dividindo os setores por supervisor e quantidade de membros da manutenção. Assim como é passado para todos do pilar a importante da utilização das ferramentas aplicadas na metodologia WCM. Dentre elas:

5S é uma metodologia japonesa que é derivada as palavras *SEIRI*, *SEITON*, *SEISO*, *SEIKETSU* e *SHITSUKE*. *SEIRI* refere-se à organização, seleção, senso de utilização. *SEITON* refere-se a ordenar, classificar, padronizar. *SEISO* refere-se ao cuidado, a limpeza, ao senso de utilização. *SEIKETSU* refere-se à decência, higiene, integridade. E por último *SHITSUKE* refere-se à educação, disciplina, engajamento,

responsabilidade. Além de uma filosofia, o 5S é a mudança no comportamento rotineiro das pessoas que habitam aquele determinado espaço de trabalho, para manter de forma íntegra a organização, a limpeza do posto de trabalho. (CAMPOS, OLIVEIRA, *et al.*, 2005)

KAIZEN tem como objetivo a melhoria contínua, é uma filosofia que deve atingir todos os membros da indústria, trazendo o comprometimento de cada um para executar tarefas rotineiras que irão fazer a diferença com o decorrer do tempo. É importante estabelecer indicadores para visualizar e conduzir as melhorias. (DORAN, 1981) traz que os objetivos tem que ser específicos, mensuráveis, atingíveis, relevantes e temporais. Conhecido como objetivos *SMART*.

5W1H uma ferramenta que tem por objetivo encontrar os aspectos a serem definidos quando elaborado um plano de ação. As seis perguntas chaves: “O que?” (What?), “Quando?” (When?), “Quem?” (Who?), “Onde?” (Where?) e “Como?” (How?) auxiliam a desenvolver uma solução para o problema. (YAMASHINA, 2000)

5 Porquês, é um método simples que auxilia a encontrar a causa raiz do problema. Através de cinco perguntas consecutivas do porquê de os fatos terem acontecido daquela forma. As perguntas vão instigar a imaginação e a compreensão de que um sistema pode estar interligado, ou seja, um equipamento pode falhar por inúmeras situações e as perguntas vão direcionar hipóteses que podem ser validadas, até que a causa seja encontrada. As 5 perguntas não são obrigatórias, pois um problema pode ser encontrado com apenas 3. (YAMASHINA, 2000)

5G é uma ferramenta aplicada para desenvolver um trabalho de forma lógica e clara, pois segue uma ordem das palavras *GEMBA*: vá ao local onde o problema se encontra; *GEMBUTSU*: Evidencie os fatos; *GENJITSU*: Verifique os dados e parâmetros; *GENRI*: Se referencie a uma teoria e *GENSOKU*: Procure por padrões e normas especializadas. Assim segundo (YAMASHINA, 2000) as ações podem ser traçadas com segurança.

O Ciclo PDCA é muito utilizado como ferramenta de gestão para coordenar a equipe. O nome é a abreviação das palavras P (*plan*), D (*do*), C (*check*) e A (*action*). Primeira etapa é planejar as ideias para melhorar o processo selecionado, quantificar a meta e selecionar a equipe de atuação do projeto. A segunda etapa já é mais prática, é o momento de executar as ações que foram discutidas no planejamento para alcançar os resultados estabelecidos. A terceira etapa é a acuracidade dos dados para

garantir que a meta estabelecida será cumprida. Por último, a ideia da ação é padronizar as melhorias executadas e procurar áreas com o mesmo problema para que as melhorias sejam aplicadas, de acordo com a estratégia modelo já executada. (LARRY e LEE, 2004)

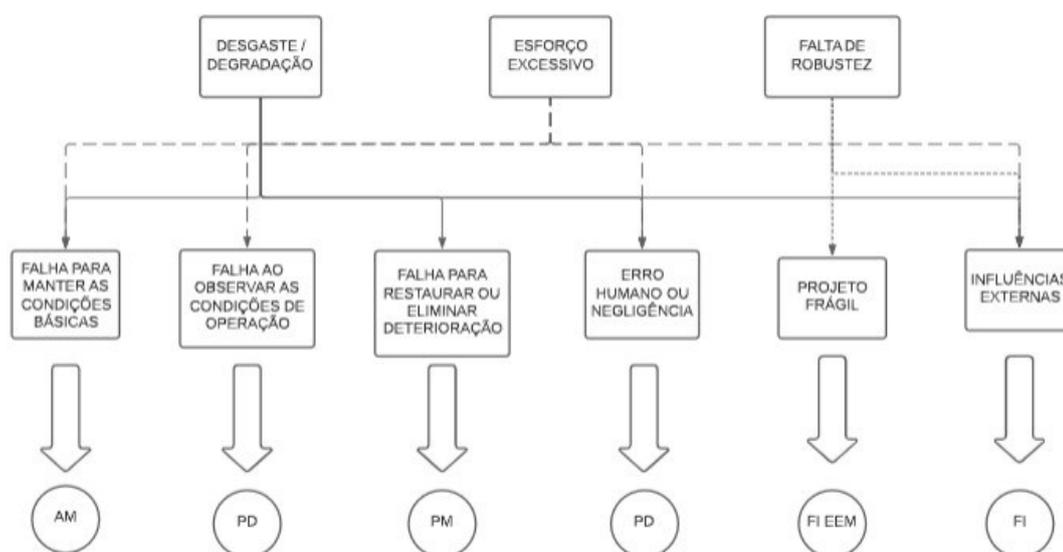
4M é uma ferramenta oriunda do diagrama de Ishikawa. (MIGUEL, 2001). As quatro siglas “M” se refere as palavras: método, material, mão de obra ou máquina. Procura-se entender quais dos subgrupos tem ligação com o problema. É levantado hipóteses dentro de cada sub grupo para auxiliar no direcionamento e avaliação da causa-raiz do problema.

O primeiro passo da manutenção tem por objetivo reduzir a deterioração forçada e acelerada dos equipamentos devido as condições básicas de operação. O tempo da aplicação do passo 1 varia conforme a complexidade da máquina. A intenção é reduzir o MTTR e estabilizar o MTBF retomando o equipamento as condições iniciais. Substituir componentes já desgastados, peças de segunda linha substituídas provisoriamente devem ser substituídas por originais. Fontes de sujidade devem ser eliminadas. Rota padrão de monitoramento dos parâmetros do equipamento deve ser traçada. Pontos de insegurança devem ser reestabelecidas para uma condição segura de operação. Essa ação pode ser considerada como uma grande “limpeza” do equipamento. Restaurar a condição de base é uma atividade que parece ser esporádica, mas a ideia é tornar a atividade rotineira para manter sempre as condições ideais. (YAMASHINA, 2000)

Segundo passo tem o objetivo de evitar falhas repetitivas e registrar as contramedidas executadas para cada falha apresentada no equipamento. A análise de falha é realizada através do documento chamado de EWO. No qual possui as ferramentas de 5W1H, 4M para instigar os profissionais a encontrar uma causa raiz para o problema. Para cada quebra é discutido uma contramedida para evitar que a falha venha acontecer novamente. Dessa forma é possível criar um histórico de falhas do equipamento e armazenar a documentação com intuito monitorar o equipamento. A tipologia da causa raiz pode ser de 3 formas: desgaste/degradação, esforço excessivo ou falta de robustez conforme podemos visualizar na figura 9. As falhas ainda podem ser classificadas de acordo com 6 tipologias: falha para manter as condições básicas do equipamento, falha ao observar as condições de operação, falha para restaurar ou eliminar a deterioração, erro humano ou negligência, projeto frágil ou influências externas. Através da estratificação da tipologia da falha é possível

direcionar a atividade para um pilar do WCM. Exemplo: Foi identificado que a falha aconteceu devido a um desgaste prematuro do componente, que veio a falhar e parou o equipamento. Essa falha será direcionada para o pilar de manutenção profissional que poderá resolver de diversas maneiras. Uma delas é diminuir o tempo da troca do componente através do plano preventivo do equipamento, com o intuito de evitar que a falha aconteça novamente. (YAMASHINA, 2000)

**Figura 9 - Tipologia causa raiz**



**Fonte: Adaptado de Yamashina (2000)**

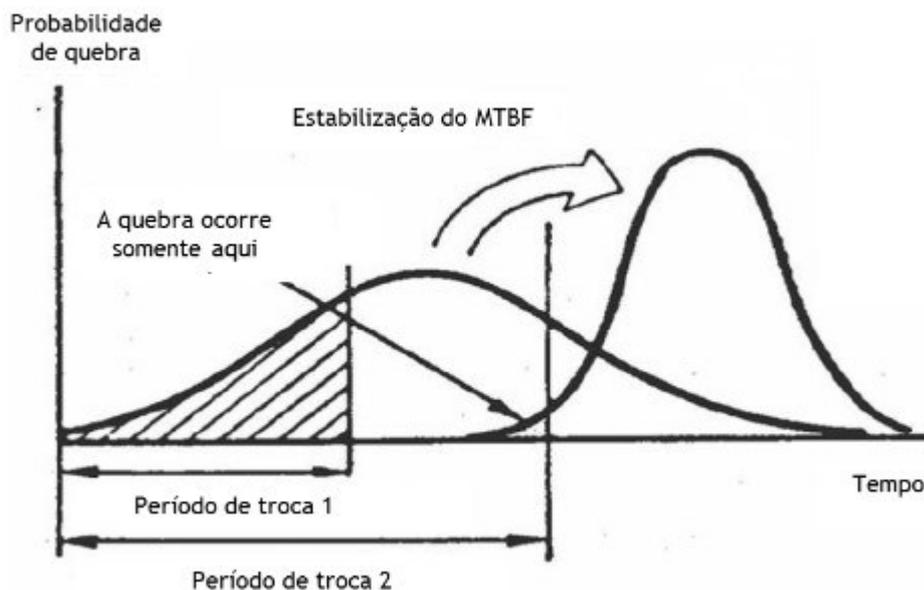
A terceira etapa é a construção do machine ledger (o livro da máquina) e a definição dos padrões de manutenção periódica. O livro da máquina é um documento articulado criado para os equipamentos que atingem o passo 3 da metodologia. O documento deve ser composto por todos os componentes do equipamento. Assim como categorizar os componentes em A, B e C. Componente A são componentes que se estragam, o equipamento por completo para. Componentes B são componentes que se estragam não geram uma parada, mas geram uma má qualidade no produto ou diminui a performance e conseqüentemente o OEE do equipamento. O componente classificado como C, geralmente são componentes que trabalham em paralelo com outros iguais e que se caso um deles para, não afeta a performance do equipamento e nem a qualidade do produto. Também incluir a estratégia de manutenção de cada componente sendo classificados como AM (Autonomous Maintenance – Manutenção autônoma), TBM (Time Based Maintenance – Manutenção baseada no tempo) ou CBM (Condition Based Maintenance –

Manutenção baseada em condição). No livro do equipamento também tem informações sobre o MTTR e o MTBF de cada componente, assim como sua tipologia de manutenção, caso seja TBM é possível visualizar a frequência que o componente é substituído em intervalo de tempo. O livro da máquina auxilia na gestão visual das falhas de cada componente. Para criar o livro da máquina é necessário realizar as seguintes atividades: 1) Separar o equipamento em sistemas, subsistemas e componentes; 2) Obter a documentação técnica de cada componente, ou a referência de identificação para compra; 3) Recolher informações sobre o datasheet de itens comercial e 4) Registrar as falhas de cada componente. (YAMASHINA, 2000)

A manutenção preventiva através da substituição, lubrificação e inspeção antecipam a ocorrência de uma avaria. Desde que as condições de base foram restauradas no primeiro passo, o equipamento volta a funcionar e a se deteriorar e por essa razão é difícil prever o frequência entre falhas mas a manutenção periódica intervém e por isso é necessário formular dois padrões de manutenção, a manutenção autônoma pelo calendário AM que controlam limpeza, lubrificação, inspeção de parâmetros e outra atividade para PM que se preocupa com folgas, trincas, empenamento, ruídos, mas não deixa de visualizar fontes de sujidade e acompanhar a lubrificação. Na Figura 10 e na Figura 11 temos um exemplo de calendário do machine ledger, esse calendário possui marcações por período que auxiliam a programar a manutenção. O padrão das marcações é um quadrado dividido em 4 triângulos, as atividades programadas são marcadas na parte inferior podendo ser dividida entre uma manutenção preventiva (amarela), uma manutenção devida problemas de qualidade (rosa) ou gerando paradas intermitentes de curto período de tempo (verde). A marcação de uma quebra é feita através de um triângulo vermelho no lado direito. O triângulo azul do lado esquerdo representa uma intervenção de ciclo extra e por último o triângulo superior é a marcação se uma atividade foi realizada ou não.



**Figura 12 - Estabilização do MTBF**



**Fonte: Adaptado de Yamashina (2022)**

O Quarto passo da manutenção profissional é identificar os componentes do equipamento selecionando através da priorização de custos, para prolongar sua vida útil. Necessário identificar os pontos fracos das máquinas para deixar os componentes mais robustos aumentando sua confiabilidade, com o intuito de reduzir os custos de manutenção preventiva.

O quinto passo tem como objetivo da criação de um plano de manutenção periódico baseado na quantidade de horas de funcionamento, mudando a estratégia de TBM para HBM (Hour Based Maintenance). Além de manter o fluxo do plano de manutenção é necessário implementar mudanças no equipamento para facilitar o dia a dia dos profissionais minimizando o tempo de atuação. Com foco no tempo, as perguntas a seguir devem ser levantadas: É possível transferir as tarefas para o pilar de AM? É possível eliminar algumas tarefas? É possível combinar tarefas? É possível reorganizar algumas tarefas? É possível simplificar algumas tarefas? Caso alguma dessas perguntas sejam possíveis de se realizar, é possível reduzir o tempo de manutenção profissional e consequentemente o custo. (YAMASHINA, 2000)

O sexto passo visa construir um sistema de manutenção baseado na condição, ou seja, a substituição de TBM pela CBM. Maximizando a vida útil dos componentes de maior custo preventivo. O objetivo é obter o ciclo de vida útil de cada componente com base em parâmetros e registro de dados. Tendo como tarefa, a intervenção do

equipamento antes que o componente ocasione uma falha. Dessa forma manutenções desnecessárias são retiradas do plano preventivo e baseada na condição de saúde do equipamento, esta tarefa é programada. (YAMASHINA, 2000).

O sétimo e último passo do pilar tem por objetivo monitorar a aplicação de todos os passos anteriores. Organizar e monitorar os indicadores de MTTR, MTBF e MTTF para cada equipamento adicionado na metodologia, garantir que as ações executadas nos passos anteriores continuem sendo seguidas pelo plano estratégico traçado para garantir a sustentabilidade do equipamento. Expandir o conhecimento da metodologia aplicada na máquina modelo para os outros equipamentos. (YAMASHINA, 2000).

## **2.5 O conceito da engenharia reversa**

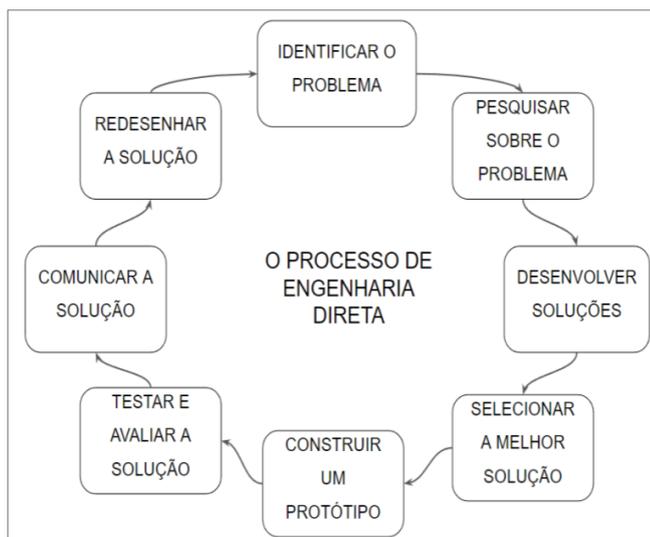
A definição de engenharia reversa (ER) segundo (MESSLER, 2014), em seu trabalho aplicado no ramo da tecnologia de hardware, é um processo para descobrir as características fundamentais de funcionalidade de um produto ou para descobrir o sistema estruturado para desempenhar aquela função através de uma profunda análise da composição e desempenho. O processo envolve a desmontagem do sistema ou subsistema até chegar ao nível componente, onde não é mais possível separá-lo do restante. O objetivo é entender quais funções o componente desempenha, quais características são importantes o suficiente para que seja possível reproduzi-lo com a mesma essência. Embora talvez até melhorar seu desempenho ou então reduzir seu custo de fabricação buscando alternativas de fabricação. A técnica pode ser útil para diferentes áreas da engenharia. O segredo por trás da qualidade de um produto está ligado à sua receita. É preciso aplicar experimentos sofisticados para se encontrar com exatidão os ingredientes utilizados nesta receita.

Segundo (MESSLER, 2014) a ER é um ótimo recurso para resolução de problemas. Na resolução de problemas de trás para frente, inicia-se a investigação a partir do resultado e tenta-se descobrir o ponto de partida. Assim é possível descobrir qual foi o caminho adotado, qual foi a metodologia adotada para chegar em determinado resultado. Isso é uma técnica diferente da proposta convencional de resolução de problema ensinada nas graduações de engenharia. Onde o ponto de partida é dado através de dados iniciais, condições de contorno e o objetivo final é encontrar o resultado da equação.

Para (WONG, 2018), existem dois tipos de engenharia a engenharia reversa (ER) e a engenharia convencional (EC). A EC é o processo de visualizar uma necessidade do dia-a-dia e desenvolver um produto ou um processo, executando uma sequência lógica de etapas para encontrar o ponto ideal do produto antes de iniciar sua fabricação. As etapas da EC envolvem o estudo do material, a análise do desempenho, a execução de um protótipo, testes em laboratório e em alguns casos até a utilização de simulação numérica computacional. Já o processo de duplicação de uma peça existente, sem se conhecer as especificações técnicas, é chamada de engenharia reversa. A ER parte de um produto ou processo já existente e sem documentação técnica o produto é reconstruído. O motivo da aplicação pode ser diversos, teremos um tópico a frente que explicara alguns deles. O ponto de partida é encontrar as características específicas do produto original e compreender através dos resultados como este produto foi produzido, quais processos foram utilizados, quais características são essenciais para manter o desempenho original. Pois segundo (WONG, 2018) o ponto chave da ER é descobrir como o produto foi fabricado, e para isso faz uma analogia ao origami. Só é possível de se reproduzir um origami primeiramente desdobrando-o e descobrindo quais etapas e dobras foram aplicadas passo a passo até chegar em sua geometria final.

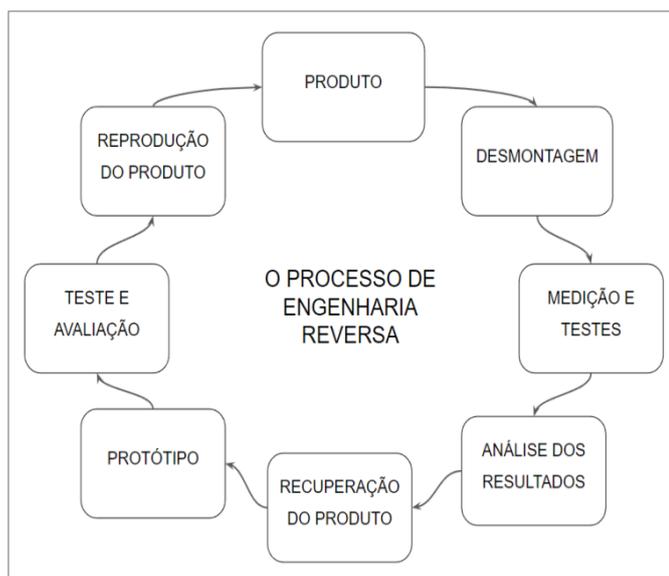
De acordo com (INGLE, 1994) a essência da ER é o desenvolvimento e descoberta de dados técnicos de um objeto existente. Um processo pelo qual irá passar pelos conceitos de ER deve ser bem selecionado, normalmente são projetos cuja a intensão visa aumentar a capacidade produtiva ou reduzir custos. A taxa de sucesso obtida para executar o projeto, se dá através do retorno produtivo obtido ou a quantidade de dinheiro que se deixou de gastar em comparação ao investimento aplicado para a pesquisa. Assim é possível convencer a empresa que um esforço realizado hoje poderá trazer retornos no futuro. Na Figura 13 é representado o fluxo de criação de um componente através da engenharia direta. Já na Figura 14 é representado o fluxo da engenharia reversa.

**Figura 13 - Fluxograma do processo de engenharia direta**



Fonte: Adaptado de Messler (2014)

**Figura 14 - Fluxograma do processo de engenharia reversa**



Fonte: Adaptado de Ingle (1994).

## 2.6 Aplicações da engenharia reversa

Diante de um mercado tão competitivo, as empresas buscam melhorar a vida útil de seus produtos e reduzir custos. Por esse motivo optam por utilizar a engenharia reversa. Na manufatura essas aplicações estão diretamente ligadas a melhoria, correção e documentação de itens obsoletos. A seguir são descritas algumas dessas aplicações mais detalhadas. (SIMÃO, 2021)

Criação de um novo produto: ocorre quando um novo modelo é fabricado a partir de outro já existente. É comum a fabricação de modelos físicos manualmente, baseado na necessidade e desempenho desejado. Essa prática é comum nas primeiras fases de desenvolvimento de produto, pois é importante o produto passar por testes antes de manufaturado em larga escala.

Correção: a aplicação da engenharia reversa para reconstruir uma peça quebrada é muito comum. Os equipamentos com o passar do tempo começam a se degradar até sua fratura. Caso seja um equipamento obsoleto, e não seja possível encontrar no mercado o componente quebrado, é preciso substituí-lo de alguma maneira. Para isso, faz-se o modelamento da peça quebrada, ou do componente que não se encontra mais a venda no mercado, para que seja possível arrumar o equipamento.

Inspeção de peças: é possível através de equipamentos sofisticados, como câmeras de alta resolução para leituras geométricas, identificar se um produto manufatura está de acordo com o projeto. A inspeção de peças é comum na indústria automobilística, com o intuito de verificar se as peças produzidas estão de acordo com a qualidade esperada do processo. Assim é possível gerar relatórios de qualidade.

Documentação: Comumente nas indústrias dados técnicos dos equipamentos, desenhos técnicos de máquinas e moldes são guardados para facilitar a manutenção ou alteração de um projeto. Em casos de documentação perdida, ou projetos obsoletos é necessário recriar uma documentação e assim por meio da engenharia reversa é possível construir uma documentação.

Reprodução: existem casos de produtos que não possuem desenho ou qualquer informação técnica sobre o desenvolvimento do projeto. Mas são ferramentas que produzem peças até hoje. Caso seja necessário a engenharia discutir algum detalhe diferente seja um ajuste de medida, uma redução de peso primeiramente o produto e as ferramentas terão que passar por um processo de engenharia reversa.

O processo de ER segundo (DIAS, 2020) exige a obtenção de informações sobre o componente a ser replicado. A principal técnica inicial aplicada é a medição da peça com a utilização de instrumentos específicos para encontrar as medidas características do produto. São utilizados instrumentos específicos como por exemplo paquímetro, micrometro e até mesmo rugosímetro. Pois é necessário determinar além das características físicas do produto, quais tolerâncias de montagem foram aplicadas

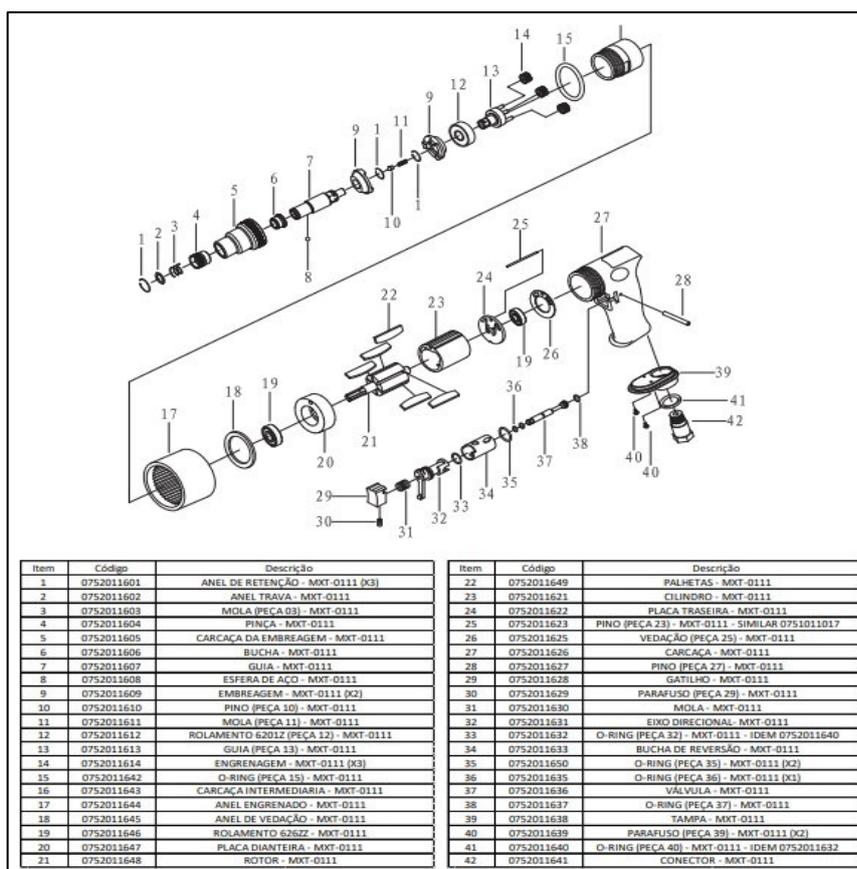
no produto. Afinal, sua montagem impacta diretamente na funcionalidade da peça, se tratando de produtos aplicados na engenharia mecânica. Para cada componente, é necessário analisar seu material constituinte, além da análise metrológica. Por isso se aplica as análises de natureza química. Já as tolerâncias, todavia tem que ser descritas a partir de analogias, e obtidas através de experimentação.

## **2.7 Etapas do processo da engenharia reversa**

O ser humano tem um instinto que faz as pessoas desmontarem ou destruírem algo que as desperta curiosidade. Quando é necessário entender um mecanismo por exemplo, a melhor maneira de fazer isso é desmontando e remontando. Durante este processo, o sujeito consegue assimilar a essência de cada componente, cada subsistema e compreender como um todo, a funcionalidade do sistema. É um estímulo para a criatividade visualizar e entender algo nunca visto antes. (INGLE, 1994).

(OTTO e WOOD, 1998) propõe desenvolver uma lista do passo a passo para desmontar e montar um sistema. Registrar em ordem cada ação executada, cada ferramenta utilizada, cada componente desmontado, cada parâmetro utilizado para que sirva de avaliação no futuro, caso a atividade seja executada por outra pessoa. Além de garantir a confiabilidade da montagem do projeto original. À medida que a desmontagem seja executada, se faz necessário a etiquetagem das peças pois durante a atividade podem existir peças parecidas que possam confundir a montagem no futuro. A lista de materiais BOM (Bill of Materials) é útil para preencher cada detalhe dos componentes e faz-se necessária pois uma vista explodida do conjunto pode ser criada e identificada por numerações, das etiquetas demarcadas com o intuito de facilitar a tarefa. Conforme podemos visualizar um exemplo na Figura 15.

**Figura 15 - Vista explodida dos componentes da parafusadeira modelo MXT-0111**



Fonte: (SIGMA, 2021)

De acordo com (MESSLER, 2014), a desmontagem exige um cuidado, para que todos os detalhes dos componentes do sistema sejam observados. Um olhar crítico é necessário e através disso é até possível observar pistas que ajudam a identificar o material de construção (metal, cerâmica, polímero ou compósito) e com a observação no acabamento é possível identificar qual foi o processo de fabricação adotado (usinagem, injeção, fundição ou conformação). Para os profissionais de manutenção existem duas ocasiões pela qual é necessário realizar a desmontagem de um conjunto do equipamento: primeira é para listar as peças que existem no equipamento e a segunda é para realizar a manutenção corretiva. A listagem das peças é de extrema importância para a manutenção do equipamento. Pois é preciso identificar quais componentes podem ocasionar uma parada do ativo, para se possa montar um estoque de peças do equipamento. Para a manutenção corretiva é exigido do profissional que o equipamento seja desmontado para identificar a causa raiz da parada de produção, assim a avaria é encontrada e substituída.

Na engenharia direta a primeira etapa é a criação do modelo do componente virtualmente, através de um projeto mecânico CAD 3D. Para que seja possível através dos recursos de montagem, juntar todas as peças do produto final. E através desse modelamento é possível identificar quais são as tolerâncias necessárias para montagem, quais serão as regiões com maior desgaste e esforços que os componentes sofreram. Segundo (WANG, 2011), a primeira etapa da engenharia reversa é a medição do componente já existente e a coleta de informações importante para fabricação. Durante esse processo, é preciso explorar ao máximo as informações da peça física para que se obtenha sucesso da recriação do componente. Mesmo que o objetivo da ER seja replicar a peça original, mas geralmente a peça duplicada não possuirá propriedades idênticas a original. Por isso quanto mais próximo, maior será o alcance do sucesso para a aplicação.

Para a maioria dos casos de peças mecânicas as ferramentas de medição mais comuns como por exemplo paquímetro e micrometro são suficientes para mensurar todos os detalhes de uma peça, até mesmo para encontrar medidas críticas. (RAJA e FERNANDES, 2008) comentam que este processo totalmente manual pode ser realizado para modelar por completo um componente, apesar ser mais trabalhoso de comparado os métodos mais tecnológicos encontrados no mercado atual. No entanto em casos de geometria complexas e dimensões indefinidas, de geometria livre, é preciso utilizar um equipamento de medição por coordenadas. Esse equipamento é constituído de eixos perpendiculares entre si (x, y e z) e a leitura é realizada através de uma solda, então quando a máquina detecta um ponto no espaço, é possível registrar em um software e os locais do ponto tocado, e a máquina consegue construir através dos pontos as dimensões do componente.

## **2.8 Poliuretano rígido**

O poliuretano (PU) é classificado como um polímero e é obtido através da reação química de um diálcool com um diisocianato. Dentre os produtos mais fabricados estão as espumas rígidas, flexíveis, elastômeros, adesivos e tintas. As aplicações desse material são diversas, sendo passível de se utilizar para o conforto (espumas, estofados, colchões) ou para isolamento térmico para os setores automotivos, eletrodomésticos e até na construção civil. (VILAR, 1999)

O poliuretano rígido (PUR) é o segundo maior mercado dentre os PU'S, perdendo somente para as espumas flexíveis. O maior consumo está concentrado na produção de isolante térmico, sendo que 40% está aplicado em equipamentos. O maior volume do consumo de isocianato e polioliol é aplicado para o isolamento térmico de refrigeradores eletrodomésticos com cerca de 58%. O PUR possui propriedades mecânicas, térmicas e de boa adesão para a montagem de sanduiches que contemplam estruturas de refrigeradores, freezers e camarás frigoríficas. Os meios de fabricação são por injeção, derramamento ou sistemas pressurizados. Sendo que o maior consumo é utilizado em espumas com baixa densidade de (28 a 50 kg/m<sup>3</sup>), usadas para isolamento térmico (VILAR, 1999). Suas propriedades físicas e térmicas podem ser visualizadas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Comparação das propriedades térmicas**

<b>Material</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade térmica a 24°C</b>	<b>Espessura necessário (mm)</b>	<b>Temperatura máxima de serviço (°C)</b>
PUR	32	0,017	20	104-121
Poliestireno Expandido	16	0,035	44	74
Lã-de-vidro	65-160	0,037	49	343
Lã-de-rocha	100-300	0,046	46-51	649 -1037
Cortiça	220	0,049	61	-
Madeira	350-500	0,112	>140	-

**Fonte: Adaptado de Vilar (1999)**

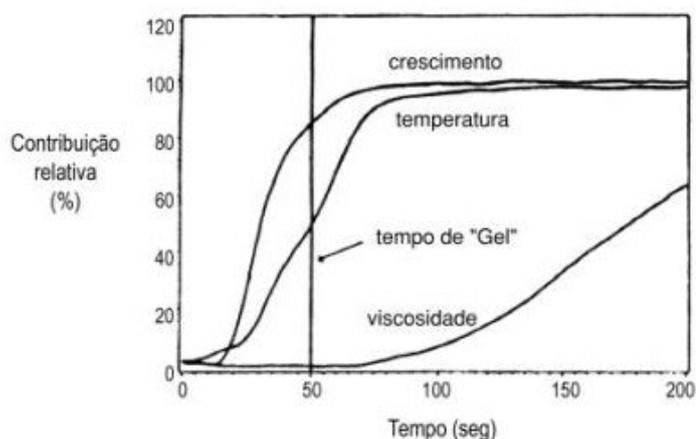
Para o processo de fabricação do PUR, uma reação química quase instantânea acontece com a mistura de dois ingredientes importantes como: o isocianato e o polioliol. O isocianato mais popularmente utilizado é o MDI polimérico, utilizado na fabricação de espumas rígidas e espumas flexíveis. A reação química de PU acontece com compostos do grupo isocianato (-N=C=O) e compostos que contenham o grupo hidroxila (-OH), chamados de pólios. Devido a facilidade de encontrar esses compostos na natureza, é possível realizar várias combinações com diferentes densidades e funcionalidades para as espumas. Dando origem assim a uma vasta classe de materiais poliméricos versáteis para diversas aplicações na indústria. (PETRÓ e SANTIN, 2021)

O polioliol mais utilizado na indústria são os poliésteres obtidos através da polimerização dos óxidos de propileno, etileno e butileno. O glicol é um copolímero de óxidos de propileno/etileno. Portanto são derivados de petróleo. O isocianato de maior

utilidade é aromático devido sua alta reatividade química. Dentre eles estão o tolueno diisocianato (TDI) e o metileno difenil isocianato (MDI). (PETRÓ e SANTIN, 2021)

As espumas rígidas quando formadas, deixam grandes retículos cheios de ar. A condutividade térmica desse gás retido nestes retículos é o responsável pela baixíssima condutividade térmica da espuma. Considerado um bom isolante térmico. É possível identificar as características de expansão das espumas através do seu volume, temperatura e viscosidade durante o processo, é possível visualizar a variação desses parâmetros conforme a Figura 16.

**Figura 16 - Contribuição das características da expansão**



Fonte: (VILAR, 1999)

A expansão se inicia quando a pressão dos gases presos nos retículos é maior que a da atmosfera, impulsionando assim o crescimento da espuma para regiões ainda não exploradas. Sua expansão para, quando atinge o equilíbrio entre as pressões internas dos gases. Assim sua forma começa a ganhar a resistência tendo a cavidade do refrigerador toda preenchida. O endurecimento é proporcional a viscosidade, e a mesma é devido a polimerização acompanhada por um aumento de temperatura simultânea devido as reações químicas serem exotérmicas. Após o preenchimento da cavidade o polímero precisa de um tempo de pós cura, antes da desmontagem. (VILAR, 1999)

## 2.9 Processo de produção do poliuretano rígido

Com suas propriedades excelentes para isolamento térmico, visto na tabela 1, as espumas rígidas são utilizadas na fabricação de eletrodomésticos, mais

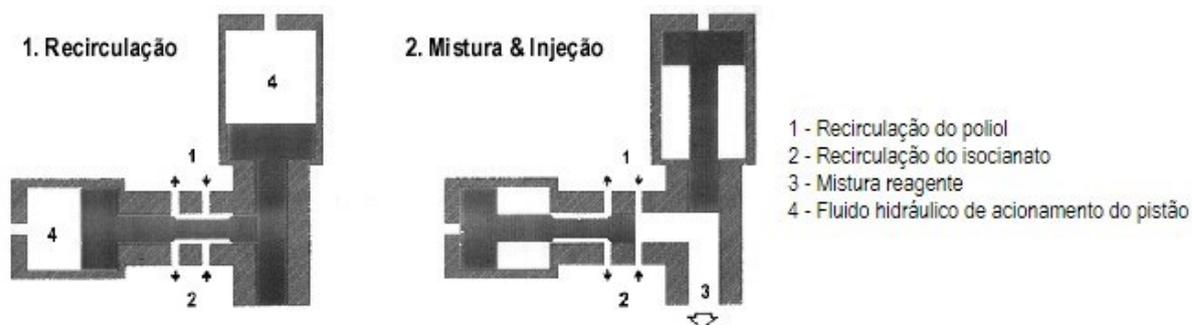
especificamente refrigeradores. O gabinete e a porta dos refrigeradores são construídos e montados com chapa metálica pintada na parte externa e a parte interna é feita de termoplástico que pode ser feito de ABS (copolímero) ou HIPS (poliestireno de alto impacto), deixando entre a montagem das duas partes, uma cavidade a ser preenchida pela espuma. A viscosidade do material misturado (MDI + Polioliol) consegue percorrer e preencher a cavidade. Essa é a principal vantagem deste material. Seu poder de expansão de até 30 vezes do seu volume original preenche qualquer detalhe. Com sua alta fluidez, a homogeneidade do preenchimento é atingida com rapidez, permitindo assim um processo em larga escala de produção. A vantagem de se utilizar o PUR para isolante térmico é sua baixa condutividade térmica, pois se comparado com outros materiais, seria necessária uma espessura maior de material. Assim os refrigeradores feitos com isolamento térmico de PUR conseguem economizar em até 30% de seu espaço, otimizando assim o espaço interno do refrigerador. (VILAR, 1999)

A Eficiência de um refrigerador é medida através do consumo de energia elétrica que o compressor de ar necessita para manter a temperatura de dentro do refrigerador inferior a temperatura do meio ambiente. O isolamento térmico é essencial pois retarda a troca de calor entre esses dois ambientes. Ou seja, a eficiência do compressor está diretamente relacionada com o processo de injeção de poliuretano. Pois quanto menor o valor de condutividade térmica do refrigerador, menos consumo de energia o compressor de ar vai necessitar para manter a temperatura controlada (VILAR, 1999).

O processo de injeção é delicado, pois é necessária encontrar através dos parâmetros citados acima, um tempo de injeção da mistura para que a velocidade da reação química coincida com o tempo de preenchimento e expansão total do volume da cavidade. O tempo que a mistura começa expandir é chamado de ponto gel, visto na Figura 17. Caso contrário, a espuma pode começar a expandir e endurecer sem ao menos ter preenchido totalmente a cavidade. Antes de acontecer a mistura principal entre o MDI e o polioliol no cabeçote de injeção, o polioliol é misturado com o AEA e armazenado em um tanque de recirculação próximo ao cabeçote de injeção. A moldagem por injeção é um método de fabricação a partir de componentes líquidos, permitindo o controle por um sistema de injeção automatizada sendo assim competitivo com processos de injeção termoplástica. O sistema é composto por um cabeçote misturador sob pressão à 200 atm. Os componentes isocianato e polioliol são

controlados e homogêneos por recirculação no pistão e voltando para o tanque, para que o material esteja de acordo com os parâmetros de temperatura e pressão adequados. Quando o pistão de recirculação retrocede, o retorno se fecha, e abre a câmara de mistura, e com grande velocidade e pressão, os reagentes se misturam e são direcionados para o bico injetor, preenchendo assim a cavidade do produto. Após a injeção de um gabinete, o pistão de recirculação avança e fecha a câmara de mistura, abrindo consequentemente a recirculação, até que um próximo produto se posicione para a próxima injeção. O bico injetor fica com resíduos da injeção anterior, os resíduos também solidificam após a mistura, e vão atrapalhar o caminho da próxima injeção. Portanto uma haste raspadora é acionada pelo sistema hidráulico do cabeçote para que seja feita a limpeza da região do bico injetor, para que o processo possa se repetir com a mesma qualidade. Podemos visualizar o processo descrito acima na imagem ilustrada na Figura 17, onde a região que necessita de limpeza é mostrada no número 3, indicando o bico injetor onde a mistura entre os reagentes acontece (VILAR, 1999).

**Figura 17 - Cabeçote de mistura**

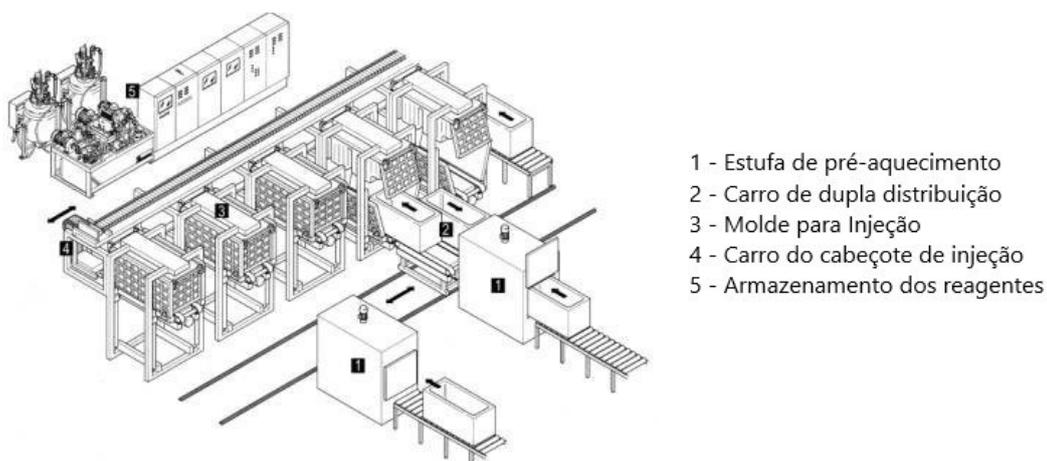


Fonte: (VILAR, 1999)

A automação mais encontrada no mercado atual são sistemas do tipo carrossel. Várias estações com molde para acomodar o produto são dispostas lado a lado, conforme podemos visualizar na Figura 18. Como vimos anteriormente, a espuma de injeção tem um alto poder de expansão enquanto ocorre sua reação química, essa expansão pode provocar variações dimensionais na montagem entre a chapa metálica e a caixa interna termoplástica, por isso é necessário a utilização de um molde para segurar a estrutura do refrigerador enquanto a injeção e o tempo de cura acontecem. Neste sistema todos os produtos são injetados pelo mesmo cabeçote de mistura, pois o conjunto está disposto sobre uma estrutura móvel que se desloca transversalmente

alternando de estação por estação, conseguindo assim injetar a espuma em um produto, enquanto o outro está aguardando o tempo de cura. Portanto, a quantidade de moldes e estufas depende do tempo de ciclo e demanda da linha de produção. (VILAR, 1999)

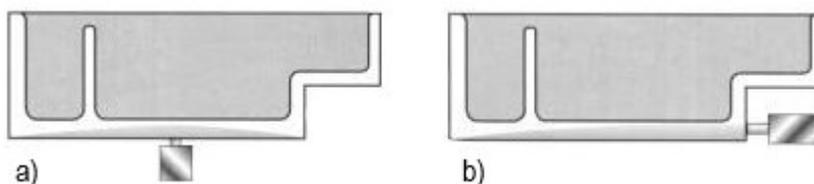
**Figura 18 - Sistema de produção em serie**



**Fonte: (VILAR, 1999).**

A injeção nos gabinetes pode ser realizada de duas formas, uma pela entrada na traseira do refrigerador ou outra por uma entrada localizada na região onde é acomodado o compressor. A maior parte da aplicação é pelo compartimento do compressor, pois essa região é mais escondida do que a outra. Assim os pontos de processo não ficam amostra no produto final. Conforme podemos ver na Figura 19 (VILAR, 1999).

**Figura 19 - Ponto de injeção no gabinete**



**Fonte: (VILAR, 1999).**

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Iniciamos as pesquisas de engenharia reversa utilizando como referência uma haste raspadora e um bico do cabeçote de poliuretano apresentados na Figura 20 e na Figura 21. Esses são componentes originais do equipamento selecionados para descobrirmos as propriedades mecânicas fundamentais do processo.

**Figura 20 - Haste raspadora original do equipamento**



Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 21 - Bico modelo D, 2 seções.**



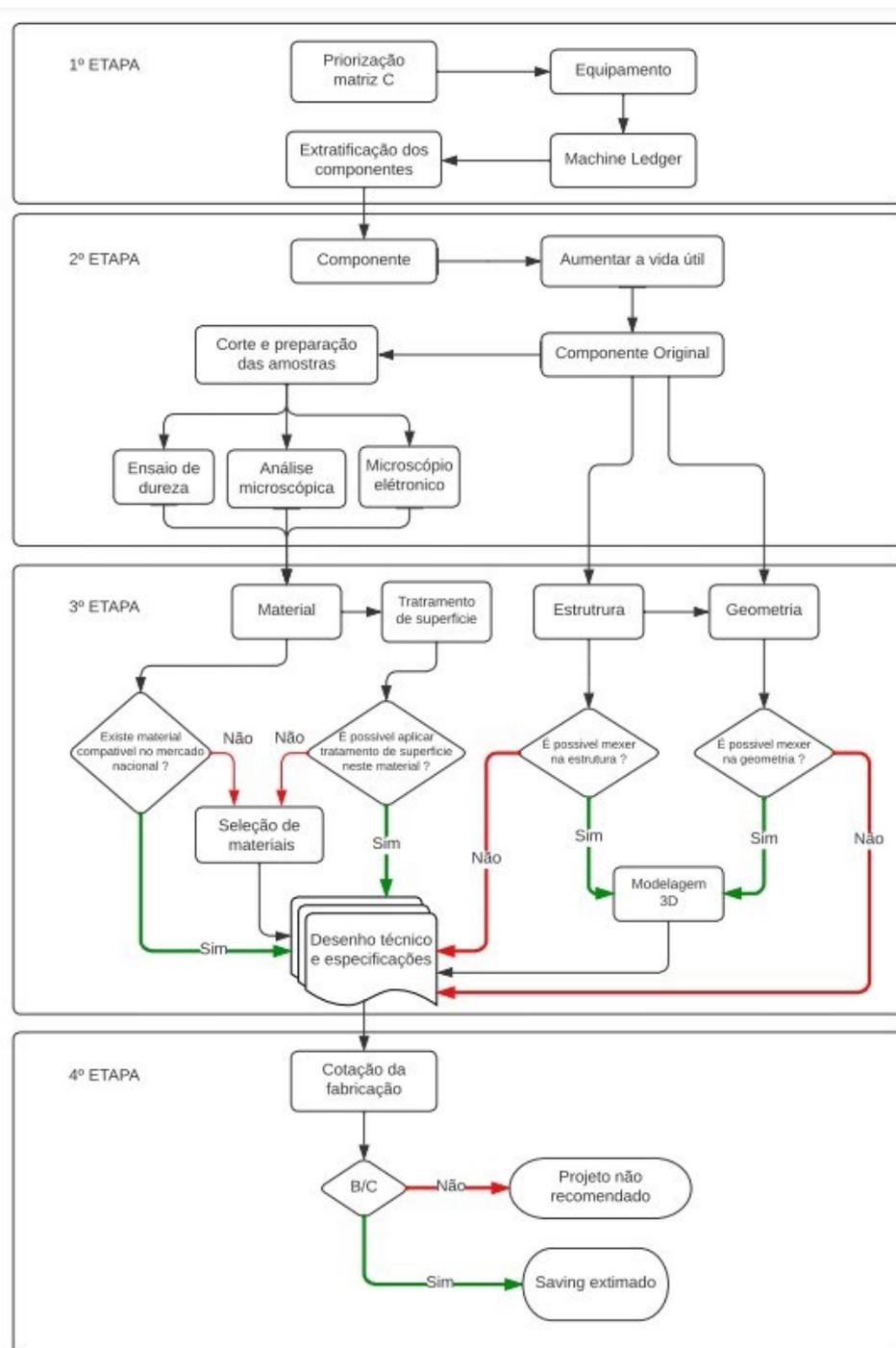
Fonte: Autoria própria (2023)

Também foram utilizadas ferramentas do laboratório de metrologia para coletar informações físicas do componente para modelagem 3D. Dentre eles estão um paquímetro digital de 150mm Mitutoyo de resolução/graduação: 0,01mm/0,0005”.

#### 3.2 Métodos

Este trabalho teve por base a utilização da metodologia WCM aplicada na empresa avaliada. Tem-se a divisão do trabalho em 4 etapas resumido na Figura 22.

**Figura 22 - Fluxograma das etapas**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Seguindo a metodologia aplica-se primeiro a priorização de projeto, de modo quantitativo selecionamos através da matriz C o equipamento com maior custo de manutenção preventiva. Ainda na primeira etapa da priorização avaliamos o plano preventivo do equipamento para selecionarmos o componente que mais impacta no

custo de manutenção. Assim, concluímos a primeira etapa que é a priorização do projeto.

Na segunda etapa deste trabalho foram avaliadas as características mecânicas do componente original através de ensaios laboratoriais para encontrarmos a composição química do material, medir sua resistência mecânica e descobrir o processo de fabricação. Para isso o componente foi dividido em amostras conforme a Figura 23, para a realização dos ensaios destrutivos sendo identificadas conforme a Tabela 2.

**Figura 23 - Amostras para ensaio.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

**Tabela 2 - Identificação das amostras**

<b>Amostra</b>	<b>Localização</b>	<b>Quantidade</b>
A	Base da haste	1
B	Meio da haste	1
C	Meio da haste	1
D	Corpo do bico	1
E	Ponta da haste	1
F	Ponta do bico	1
G	Ponta da haste	1

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Todas as análises foram realizadas pelo laboratório físico-químico da empresa METALAB na região de Joinville – SC. As análises foram custeadas pela própria empresa do estudo de caso e serão consideradas na viabilidade econômica do projeto de redução de custos da manutenção preventiva.

Com o intuito de descobrirmos a composição química do material as amostras E e F foram submetidas ao ensaio de análise química via espectrometria de emissão ótica e o método utilizado foi ASTM E415 – 17: *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*.

Para descobrirmos a resistência mecânica do núcleo e da camada do componente a amostra G foi submetida ao ensaio de micro dureza (mHV) onde foram realizadas 3 medições na camada e no núcleo da amostra para encontrar uma média de dureza e as amostras E e F foram submetidas a 9 medições iniciando a primeira mediação mais próxima da camada na distância de 0,05 mm até 1 mm. As amostras seguiram a preparação ASTM E3: 11 – *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* e o método de ensaio ASTM E 384:17 – *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of materials*.

Para visualizarmos a profundidade da dureza de camada e a formas metalográficas da liga de aço as amostras E e F foram preparadas através da metodologia ASTM E 3: 11 – *Standard Guide For Preparation of metallographic Specimens* e ASTM E 407: 07 – *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys* e visualizadas pelo microscópio óptico metalográfico modelo ZEISS utilizando o método de ensaio ASTM E 7: 17 – *Standard Terminology Relating to metallography*.

Elementos de liga como por exemplo o alumínio extrapolam os valores do ensaio de análise química via espectrometria de emissão ótica e por isso as amostras A, B, C, D, E e F foram analisadas via microanálise química via espectrometria por energia dispersiva seguindo a metodologia ASTM E1829: 14(2020) – *Standard Guide For Handling Specimens Prior to Surface Analysis* e ASTM e1508: 12(2019) – *Standard Guide For Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy*, para identificar os elementos de liga na camada e no núcleo das amostras.

A terceira etapa de modo exploratório procurou-se encontrar na bibliografia referências ao aço DIN 41CrAlMo7 para avaliar se o mesmo possui algum processo de fabricação para aumentar a sua vida útil e então reduzir a frequência de trocas da manutenção preventiva e conseqüentemente diminuir o custo de reposição de peças. Foram avaliadas de acordo com a metodologia WCM, as principais premissas que o professor Hajime Yamashina recomenda para aumentar a vida útil do componente sendo elas: material, tratamento de superfície, geometria ou estrutura.

Na quarta e última etapa foi avaliado de forma dedutiva para visualizar se seria viável economicamente alterar algumas das propriedades citadas acima. Visto que o

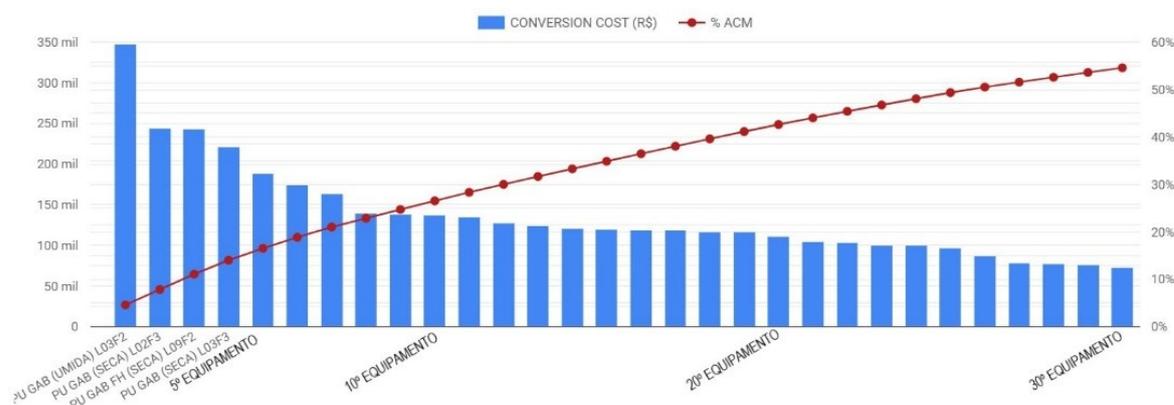
custo da implementação deve ser inferior a uma expectativa de vida útil do novo componente produzido. Dessa forma a manutenção consegue depreciar o valor de investimento, na economia dos custos com manutenção preventiva do equipamento. Para isso, utilizou-se o cálculo do custo versus benefício (B/C) utilizado na ferramenta do pilar de Cost Deployment, para validar a viabilidade econômica do projeto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Priorização do equipamento.

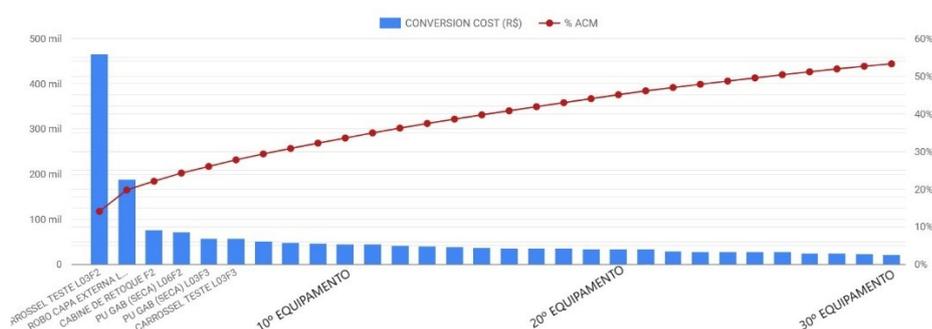
A primeira etapa do desenvolvimento deste trabalho foi realizada através da priorização dos custos de manutenção preventiva realizado pelo pilar de *Cost Deployment* (CD), mais especificada através da matriz C aplicada no passo 4. Olhando para a matriz C foi possível identificar o equipamento que mais impacta no custo de manutenção preventiva da área de montagem e o responsável é o equipamento do processo de injeção de poliuretano. Processo esse no qual foi detalhado neste trabalho para compreender a funcionalidade de cada componente mecânico. No último semestre avaliado, o primeiro equipamento da classificação é o equipamento de injeção de poliuretano da linha L03F02 conforme podemos visualizar na Figura 24 e 25. Os dados do gráfico apresentados são dados empresariais e devido a ética de sigilo empresarial ocultamos os outros equipamentos da classificação.

**Figura 24 - Matriz C 2022.12 (Gastos com manutenção preventiva)**



Fonte: Adaptado dos dados empresariais (2022)

**Figura 25 - Matriz C 2022.06 (Gastos com manutenção preventiva)**

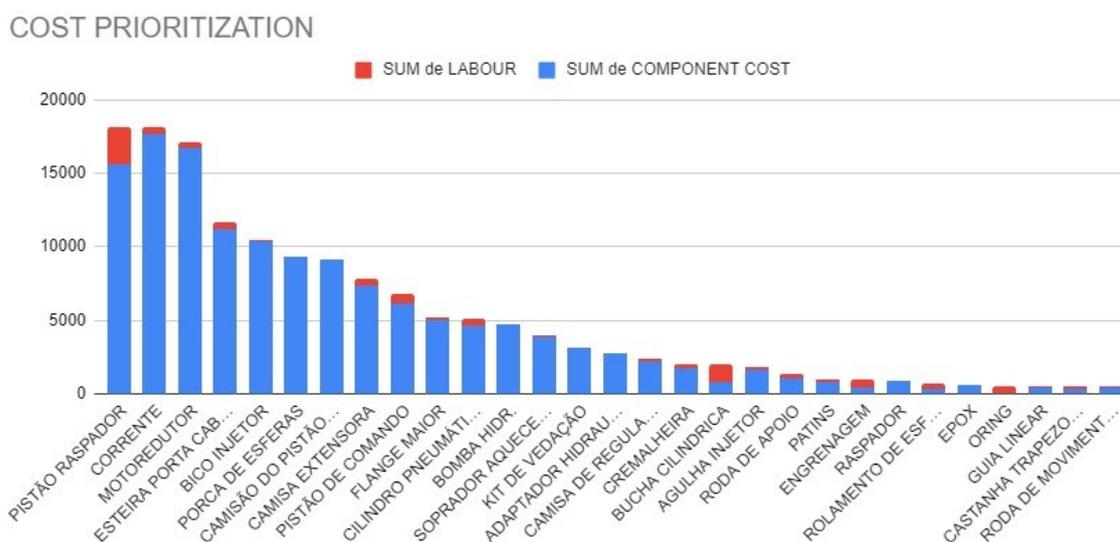


Fonte: Adaptado dos dados empresariais (2022)

## 4.2 Priorização do componente

Para priorizar o componente que demanda maior recurso da manutenção preventiva, foi levantado o valor do custo de reposição de peças, frequência de trocas, calendário de preventiva e mão de obra necessária para executar as atividades do equipamento de injeção de poliuretano da linha L02F03, conforme podemos visualizar na Figura 26.

Figura 26 – Injeção de Gabinetes - L02F03.



Fonte: Adaptado dos dados empresariais (2022)

O componente com maior custo preventivo é, portanto, o pistão raspador, cuja a função dele é limpar o bico de injeção do cabeçote após o processo. Seu custo se tornou elevado no plano preventivo devido ser um componente que custa no mercado nacional R\$ 2,900.00 e segundo o plano preventivo sua frequência de troca é de 4 em 4 meses. Sendo que a análise acima foi realizada para o período de 1 ano. Ou seja, em um ano é necessário realizar a troca de 3 a 4 vezes, gerando um custo total superior a R\$ 15.000,00 para este equipamento.

No laboratório de cabeçotes de injeção de poliuretano conseguimos verificar todas as linhas de produção com seus respectivos modelos e cabeçotes instalados conforme a Tabela 3. Assim foi possível identificar que foram instalados na L03F02 10 modelos de cabeçote do tipo A e 2 modelos de cabeçote do tipo E.

Tabela 3 - Quadro Kankan resumido do controle preventivo dos cabeçotes.

Linha de montagem	Quantidade	Modelo
A	2	B
A	1	C
A	1	D
B	10	A
B	2	B
L03F2	10	A
L03F2	2	E
D	2	B
E	1	G
F	1	D
G	2	G
H	6	D
H	1	F
I	10	C
J	2	B
L03F03	2	E
L	2	F
L	3	B

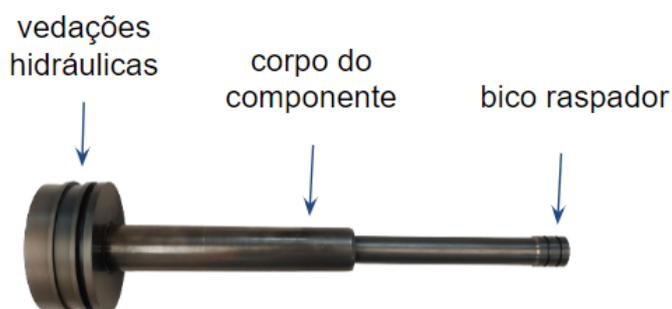
Fonte: Adaptado dos dados empresariais (2022)

A haste raspadora é o componente de maior custo preventivo do equipamento e é somente utilizado no modelo E. Não é possível comprar peças originais desse modelo de cabeçote devido um desacordo comercial entre a empresa e o fornecedor. Por isso teve-se a necessidade de produzir as peças de reposição nacionalmente. O alto valor de gasto preventivo desse componente é devido a alta frequência de troca, pois, o componente não resiste ao desgaste abrasivo do processo.

### 4.3 O componente

O desgaste do componente é somente no bico em uma das pontas, conforme podemos visualizar na Figura 27. Pois, é nessa região que a haste tem a função de raspar os resíduos de poliuretano que restou do processo anterior. Assim toda haste raspadora quando desgasta sua ponta, conforme podemos visualizar na Figura 28, é descartado o componente.

**Figura 27 - Haste raspadora do cabeçote modelo E.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

**Figura 28 - Antes e depois do desgastada.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

O bico desgastado possui um diâmetro menor que o especificado pelo projeto devido ao desgaste abrasivo que a haste sofre com os resíduos de espuma já endurecidos na parede do bico injetor. Caso o diâmetro do bico diminua de tamanho, conforme podemos visualizar na Figura 29, no momento da injeção o material terá uma brecha suficiente entre o bico de injeção e a haste raspadora, invadindo assim o interior do cabeçote provocando uma contaminação nos demais componentes, podendo causar um trancamento total do conjunto. Por isso foi colocado estrategicamente no plano de manutenção preventiva uma frequência de troca desse componente crítico de 4 em 4 meses. Pois foi esse o período identificado pelos profissionais da manutenção com duração média da vida útil, para evitar transtornos de trancamento de cabeçote e parada da linha de produção. Um exemplo de invasão do poliuretano contaminando o interior do cabeçote pode ser visualizado na Figura 30.

**Figura 29 - Medição da vida útil do componente.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

**Figura 30 - Contaminação da espuma de poliuretano no componente.**



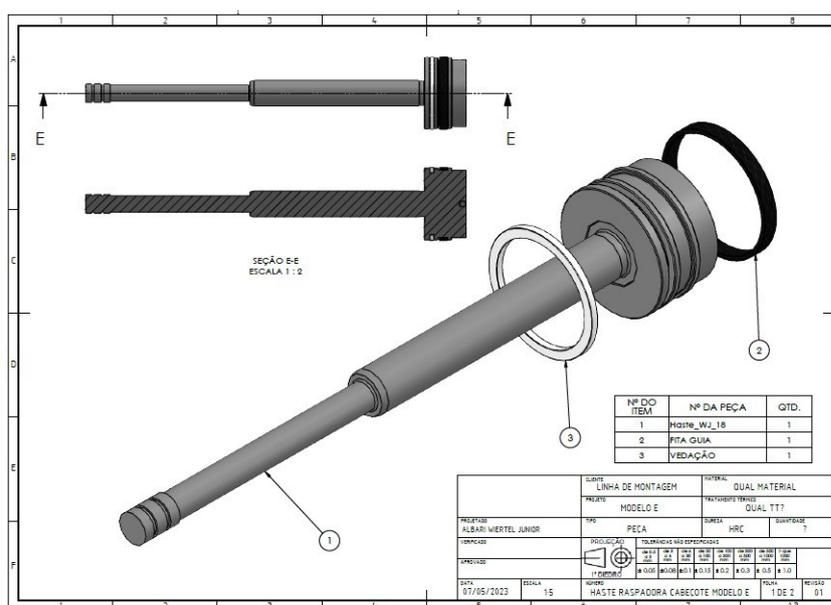
**Fonte: Autoria própria (2023)**

#### **4.4 Geometria e estrutura**

Seguindo as premissas indicadas pelo professor Hajime Yamashima uma alternativa de aumentar a vida útil do componente é a alteração de sua estrutura. Através de um benchmarking realizado dentro da própria empresa, percebemos que o modelo D é diferente dos demais modelos pois a haste raspadora é independente da base de todo o componente se comparado ao modelo E que é um componente

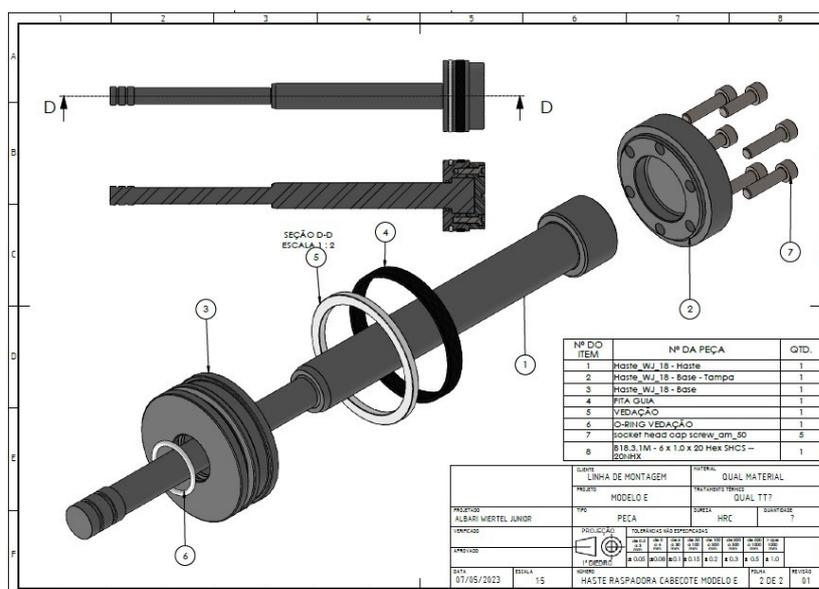
maciço conforme a figura 31. Pois se caso houver um desgaste da ponta da haste, toda a base pode ser reaproveitada conforme a figura 32. Assim construímos um modelo 3D do componente, através das dimensões originais para montarmos uma haste com partes independentes, para economizarmos na troca somente do componente desgastado.

**Figura 31 - Haste raspadora modelo E.**



Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 32 - Haste modelo E, subdivida.**



Fonte: Autoria própria (2023)

Assim o custo para produzir uma haste de menor diâmetro com as mesmas características mecânicas da original é menor. O custo de material jogado fora e de processo para desbastar um diâmetro Ø 69,1 mm para Ø 18 mm é superior se comparado ao novo modelo proposto que tem uma base com Ø 35 mm e ponta com Ø 18 mm. O preço de reposição da peça que desgasta será menor, pois possui um menor custo no processo de usinagem, um menor custo no processo de tratamento térmico e menos material desperdiçado.

#### 4.5 Composição química

Conforme a tabela 4 podemos visualizar os resultados da análise química via espectrometria de emissão ótica.

**Tabela 4 - Composição química das amostras E e F**

Composto Químico	AMOSTRA E (%)	AMOSTRA F (%)
C	0,368	0,371
Si	0,311	0,288
Mn	0,516	0,620
P	0,004	0,007
S	0,009	0,003
Cr	1,716	1,636
Mo	0,277	0,238
Ni	0,873	0,938
Al	1,000	1,000

**Fonte: Adaptado do Relatório METALAB (2023)**

Foi utilizado o site online versão estudantil, *Total Materia* que trabalha com banco de dados de materiais do mundo todo, para encontrar a composição química do material encontrado no experimento. Trata-se do material descrito na tabela 5, conhecido como aço *Nitralloy 135M*. Categoria de aço liga específico para aplicação de endurecimento superficial por nitretação a plasma. Sua composição química permite uma combinação de alta resistência ao desgaste abrasivo da superfície, com alta tenacidade de núcleo e excelente ductilidade após a nitretação.

Tabela 5 - Composição química Aço DIN 41CrAlMo7 (% peso)

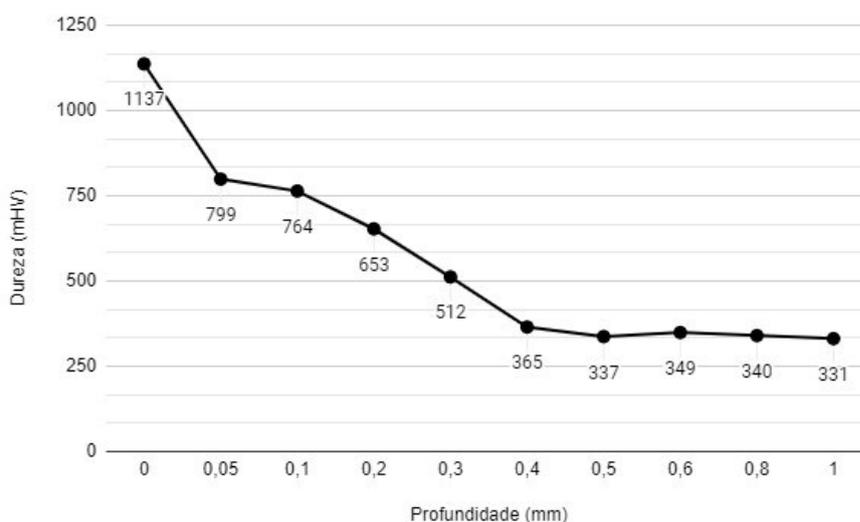
C	Cr	Mo	Al	Mn	Si	N	P	S
0,42	1,62	0,28	1,040	0,73	0,27	0,007	0,009	0,016

Fonte: Adaptado do site *Total Materia* (2023)

#### 4.6 Micro dureza vickers

Foi detectado uma elevada dureza da camada de superfície nas amostras conforme podemos visualizar na figura 33. O que indica que o último processo pela qual a haste original do fornecedor passou foi a nitretação a plasma. Atingindo uma média das 3 medições um valor de 1137 mHV.

Figura 33 - Valor obtidos no perfil de microdureza Vickers



Fonte: Adaptado do Relatório METALAB (2023)

#### 4.7 Resultados da análise MEV e EDS.

Foi possível encontrar na camada das amostras A, B, C, D, E, F a percentagem semiquantitativa dos compostos químicos Fe, N, Cr, O e Al e observar que em todas as seções da haste e do bico a superfície tem um percentual próximo de 1% de nitrogênio, ou seja, as peças passaram pelo processo de endurecimento de camada por nitretação como podemos observar na Tabela 6.

Tabela 6 - MEV e EDS na camada de superfície

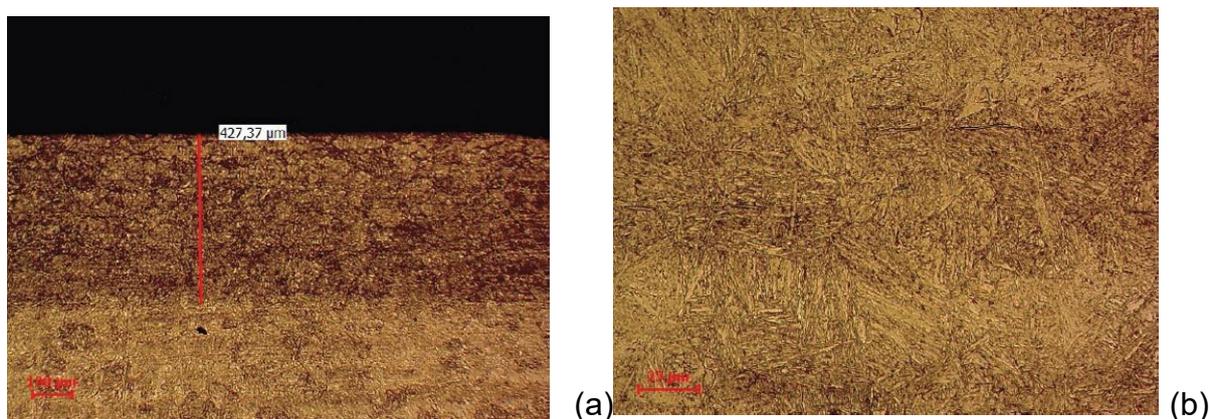
Amostra	Fe	N	Cr	O	Al
A	90,60	4,70	1,90	1,70	1,10
B	96,50	0,77	1,70	1,70	1,00
C	96,20	1,17	1,70	1,70	0,97
D	92,27	4,53	2,13	2,13	0,87
E	95,17	1,13	1,63	1,63	1,10
F	91,47	2,10	4,70	4,70	0,63

Fonte: Adaptado do Relatório METALAB (2023)

#### 4.8 Análise metalográfica

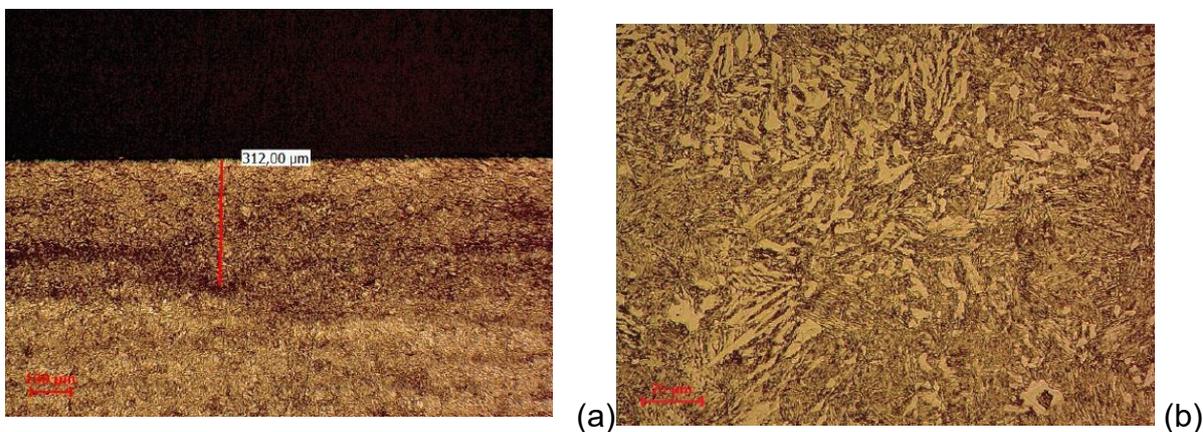
Nas amostras da ponta da haste (amostra E) apresentado na figura 34 e da ponta do bico (amostra F) apresentado na figura 35, conseguimos observar uma camada de endurecimento por difusão de 427,37 e 312,0 em micrometros respectivamente. Sendo sua microestrutura constituída de martensita revenida e endurecimento superficial de nitretação.

Figura 34 - Amostra E, aumento 100x (a) e aumento 500x (b)



Fonte: Adaptado do Relatório METALAB (2023)

Figura 35 - Amostra F, aumento 100x (a) e aumento 500x (b).

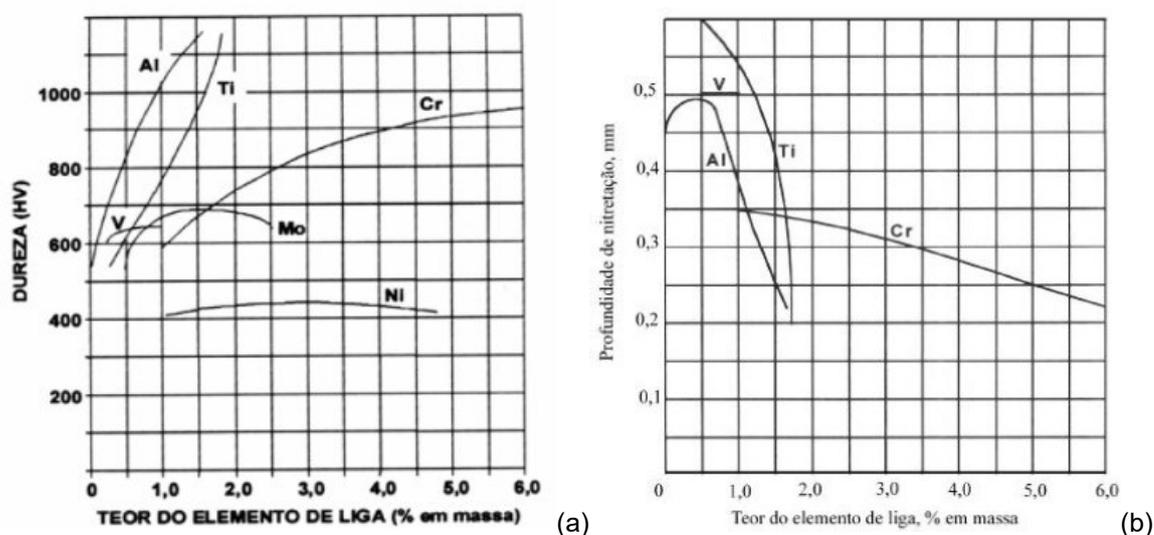


Fonte: Adaptado do Relatório METALAB (2023)

#### 4.9 Seleção do material

De acordo com os resultados, compreendemos que as características importantes para a haste raspadora de poliuretano e o bico de injeção devem possuir uma dureza na camada de superfície superior a 1000 mHV, no qual só é obtida através de um tratamento superficial. Pois, é necessário o material ter uma resistência ao desgaste abrasivo devido aos resíduos de poliuretano que sobram no bico de injeção depois do processo e, ao mesmo tempo possuir no núcleo uma elevada tenacidade para aguentar os esforços hidráulicos do sistema de atuação do cabeçote. Todas essas características são atingidas com materiais recomendados para o tratamento de superfície através da nitretação a plasma. Aços liga com os respectivos elementos químicos como por exemplo: Al, Cr, W e V favorecem a formação de nitretos proporcionando elevada dureza na camada com pouca distorção geométrica conforme podemos visualizar na Figura 36. Próximo de 1% de alumínio a liga de aço pode atingir durezas superficiais acima de 1000 mHV. E o alumínio também auxilia na profundidade de camada conforme podemos ver na figura 36.

Figura 36 - Influência dos elementos de liga na dureza da camada (a) e na profundidade da camada (b).



Fonte: (HERRING, 2018) & (BARKER e SMITH, 1973)

A liga de aço selecionado deve conter uma porcentagem de alumínio próximo de 1%. O aço DIN 41CrAlMo7 não é comercializado no Brasil. No entanto existe uma família grande de aços que contém a mesma quantidade de alumínio e que são específicos para aplicação de nitretação conforme a tabela 7:

Tabela 7 - Família de aços para nitretação

CÓDIGO DIN	CÓDIGO DIN	NOME POPULAR
1.8507	34CrAlMo5-10	NITRODUR 8507
1.8509	41CrAlMo7-10	NITRODUR 8509
1.8515	31CrMo12	NITRODUR 8515
1.8519	31CrMoV9	NITRODUR 8519
1.8521	15CrMoV5-9	
1.8522	33CrMoV12-9	NITRODUR 8522
1.8523	40CrMoV13-9	NITRODUR 8523
1.8524	8CrMo16	NITRODUR 8524
1.8550	34CrAlNi7-10	NITRODUR 8550

Fonte: Adaptado do catalogo Swiss Steel Group (2023)

O único material encontrado em território nacional foi a liga de aço 34CrAlNi7-10 com composição química similar ao SAE 8580. Conforme podemos visualizar sua similaridade através da Tabela 8.

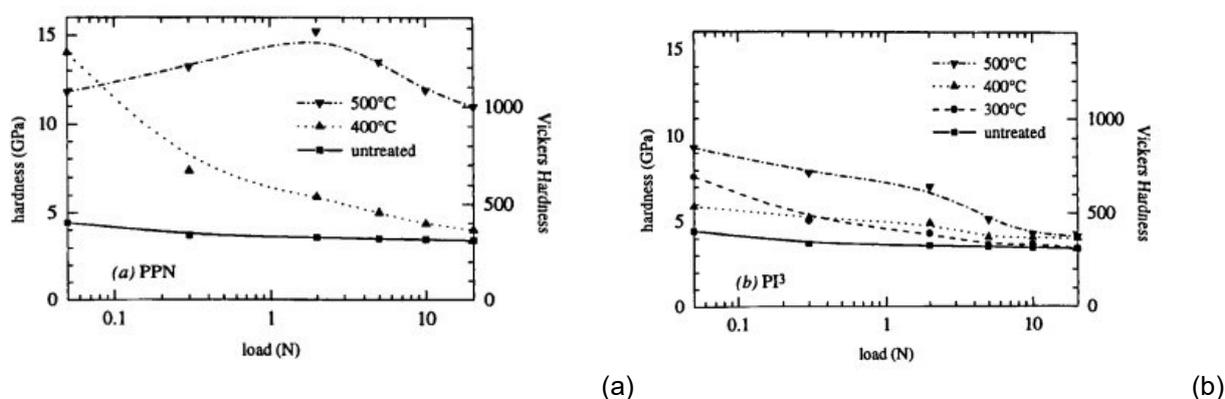
Tabela 8 – Comparação entre os aços DIN 41CrAlMo7 / DIN 34CrAlNi7-10 / SAE 8550 (% peso)

AÇO	C	Cr	Mo	Al	Mn	Si	N	P	S
DIN 41CrAlMo7-10	0,42	1,62	0,28	1,04	0,73	0,27	0,007	0,009	0,016
DIN 34CrAlNi7-10	0,35	1,69	0,24	0,92	0,53	0,31	-	0,02	0,012
SAE 8550	0,30 – 0,37	1,50 – 1,80	0,15 – 0,25	0,80 – 1,20	0,40 – 0,70	< 0,40	-	< 0,025	< 0,025

Fonte: Adaptado do site Swiss Steel Group (2023)

Foi encontrado bibliograficamente um artigo de (C. BLAWERT, 1998) que faz a comparação do tratamento de superfície do aço nitretado DIN 34CrAlNi7, comparando o processo de nitretação a plasma pulsado e o processo por imersão iônica a plasma. Onde se obteve os resultados resumidos na Figura 40.

Figura 40 - Perfil de microdureza obtido de amostras tratadas por nitretação a plasma pulsante (a) e implantação iônica por imersão em plasma (b).



Fonte: (C. BLAWERT, 1998)

Podemos observar que o tratamento superficial no aço DIN 34CrAlNi7 através do processo de nitretação a plasma pulsado consegue atingir uma dureza superior a 1000 mHV na temperatura de 500°C.

#### 4.10 Investimento

Após encontrar o material adequado para o processo o próximo passo foi realizar um orçamento para a produção das peças conforme as especificações de material e tratamento térmico/tratamento de superfície. Esse valor será considerado como valor

de investimento para aumentar a vida útil do componente. Podemos visualizar o valor de cada componente orçado para o projeto na Tabela 9.

**Tabela 9 - Orçamento dos componentes do cabeçote modelo E.**

ITEM	DESCRIÇÃO	MATERIAL	VALOR UNITÁRIO (R\$)
1	Modelo E – Haste	41CrAlMo7	1.324,0
2	Modelo E – Base	SAE 4340	678,0
3	Modelo E – Tampa	SAE 4340	496,0
TOTAL			2.498,0

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Portanto o custo total de investimento para aumentar a vida útil de 4 cabeçotes de injeção será de R\$ 9.992,00. Considerando os gastos de laboratório para descobrir o material e seu respectivo processo de produção podemos resumir o valor do investimento total do projeto na Tabela 10.

**Tabela 10 - Custo do investimento.**

ITEM	DESCRIÇÃO	VALOR (R\$)
1	4 Conjuntos novo	9.992,00
2	Ensaio laboratórios	2.000,00
TOTAL		11.992,00

**Fonte: Autoria própria (2023)**

#### 4.11 Benefício

O benefício é a quantidade de peças necessárias para manter o equipamento em bom funcionamento durante um ano e o custo da mão de obra dos profissionais para realizar a atividade preventiva. A situação atual é resumida na tabela 11.

**Tabela 11 - Custos manutenção preventiva atual**

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	FREQUÊNCIA (MESES)	VALOR UNITÁRIO (R\$)	VALOR ANO (R\$)
Peças	4	4	11.600,00	34.800,00

Mão de obra	2	4	1.280,00	3.840,00
			TOTAL	38.640,00

Fonte: Aatoria própria (2023)

Após a aplicação do projeto, a frequência da troca de peças passará de 4 meses para 12 meses. Portanto teremos um novo custo anual conforme podemos visualizar na tabela 12:

Tabela 12 - Custos manutenção preventiva após aplicação do projeto

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	FREQUÊNCIA (MESES)	VALOR UNITÁRIO (R\$)	VALOR ANO (R\$)
Peças	4	12	9.992,00	9.992,00
Mão de obra	2	12	1.280,00	1.280,00
			TOTAL	11.272,00

Fonte: Aatoria própria (2023)

A diferença do somatório do custo de peças e mão de obra durante um ano passará de R\$ 38.640,00 para R\$ 11.272,00 tendo um benefício de R\$ 27.368,00. Sendo este benefício para o primeiro ano, no entanto para o segundo ano de produção as peças do item 2 e 3 da tabela 7 são peças que não necessitam de reposição, pois não sofreriam desgaste. A única peça desgastada é a haste, portanto o retorno no 2º ano será de R\$ 32.064,00.

#### 4.12 Custo/Benefício

De acordo com a metodologia o projeto é rentável quando o valor do custo sobre o benefício é superior a 1, sendo assim, o projeto é viável de acordo com a metodologia WCM e conforme podemos visualizar nos cálculos da tabela 13 e 14.

Tabela 13 - Cálculo custo/benefício no 1º ano.

ITEM	VALOR
BENEFÍCIO	R\$ 27.368,00
CUSTO	R\$ 11.992,00
B/C	2.28

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 14 - Cálculo custo/benefício a partir do 2º ano.

ITEM	VALOR
BENEFÍCIO	R\$ 32.064,00
CUSTO	R\$ 5.296,00
B/C	6,05

Fonte: Autoria própria (2023)

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo mostrar na prática como a metodologia WCM funciona dentro de uma indústria. Com o foco em reduzir os custos de manutenção preventiva no pilar de manutenção profissional. Conclui-se que a metodologia apresentada é eficaz, pois através da análise é possível atingir uma redução de R\$ 32.064,00 no ano em manutenção preventiva. Mantendo as boas condições de trabalho e operação do equipamento, aumentando assim sua confiabilidade. Projeto aplicado a nível componente de estratificação do equipamento o que está de acordo com a metodologia. Só assim é possível focar os recursos para desenvolver projetos que são rentáveis para empresa. O grande objetivo citado pelo professor Hajime Yamashina é reduzir os custos de manutenção preventiva de um equipamento no 4º passo da metodologia WCM em até 50%. O projeto aplicado no primeiro componente do equipamento, atingiu 9% do objetivo citado acima. A metodologia deve continuar para aumentar a vida útil dos próximos componentes da estratificação para alcançarmos o objetivo final de redução de custos de manutenção preventiva em 50%.

A análise levou em consideração conceitos de engenharia reversa, para encontrar o material adequado para a aplicação do processo estudado. Os conceitos auxiliaram para iniciarmos o projeto de um ponto de partida através da análise de peças de outro fornecedor de cabeçote, cujo seus componentes fornecem um tempo de vida útil superior a um ano. Desacordo comercial podem ser comuns dentro de grandes empresas, o que dificulta a reposição de peças das máquinas, forçando as empresas a desenvolver suas próprias peças de reposição. A falta de uma metodologia para reconstruir um componente pode trazer prejuízos a uma empresa, caso tratado neste trabalho. O componente estudado é o mais crítico do processo e que mais demandou recursos para um bom funcionamento do equipamento. No entanto aplicando a metodologia de engenharia reversa pudemos encontrar as principais características necessárias para aquele componente ter uma vida útil similar as peças originais. Portanto ambas as metodologias aplicadas paralelamente auxiliam a encontrar caminhos para aumentar a confiabilidade dos equipamentos e assim reduzir os custos de manutenção preventiva.

## REFERÊNCIAS

- AURELIANO, L. P. O pilar de manutenção profissional na metodologia WCM - manufatura de classe mundial, Varginha, 2013. 50.
- BARKER, R.; SMITH, P. K. Response to gas nitriding of 1%Cr-Mo Steel. **Heat Treating Committee of Iron and Steel Institute of London**, Londres, 10 - 12 Dezembro 1973. 430 - 438.
- BORGES, R. C.; 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. **2016**, São Paulo, 29 FEVEREIRO 2015. 12.
- C. BLAWERT, B. L. M. U. H. S. S. G. A. C. K. T. S. J. T. Surface treatment of nitriding steel 34CrAlNi7: a comparison between pulsed plasma nitriding and plasma immersion ion implantation. **Surface and Coatings Technology**, Clausthal-Zellerfeld, Germany, v. 98, n. 1, p. 1181-1186, 1998. ISSN ISSN 0257-8972.
- CABRAL, J. P. S. **Organização e gestão da manutenção**. 6ª. ed. [S.l.]: Lidel, v. 1, 2006.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. Único, 2000.
- CAMPOS, R. et al. A Ferramenta 5S e suas Implicações na Gestão da Qualidade Total. **Simpep–Simpósio de Engenharia de Produção**, v. 12, p. 685 - 692, 2005.
- CAMPOS, V. F. **Controle da qualidade total (no estilo japonês)**. 8. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, v. 1, 2004.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 2ª. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, v. Único, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2ª. ed. São Paulo: MAKRON, v. volume 2, 1986.
- CLARK, D. S.; VARLEY, W. R. **Physical Metallurgy for Engineers**. 2ª. ed. London: [s.n.], 2001.
- CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações**. 2. ed. São Paulo: Atlas, v. 1, 2008.
- DIAS, A. B. ENGENHARIA REVERSA: UMA PORTA AINDA ABERTA. **ENGENHARIA REVERSA: UMA PORTA AINDA ABERTA**, RECIFE, 17 AGOSTO 2020. 9.

DORAN, G. T. There's a S.M.A.R.T. Way to Write Management's Goals and. **Management Review**, 1981. 35 - 36.

GONÇALVES, F. F.; GUIMARÃES, I. A. D.; BAGNO, R. B. Manufatura de classe mundial (WCM) como uma jornada de mudança organizacional: o caso de uma rede de fornecedores da indústria automobilística. **X Encontro mineiro de engenharia de produção**, Juiz de Fora, 1 a 3 Maio 2014. 1 - 5.

HERRING, D. **A Comprehensive guide to heat treatment**. 1ª. ed. Chicago: Industrial Heating, v. 2, 2018.

INGLE, K. A. **Reverse Engineering**. 1nd. ed. New York: McGraw-Hill, v. 1, 1994.

LARRY, K. P.; LEE, J. **Administração da produção e operações**. 1. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, v. 1, 2004.

LIMA, W. D. C.; LIMA, C. R. C.; SALLES, A. A. Manutenção Preditiva, o Caminho para a Excelência – Uma Vantagem Competitiva. **13º SIMPEP**, Bauru, 06 a 08 Novembro 2006. 1 - 8.

MESSLER, R. W. **Reverse Engineering**. 1nd. ed. New York: MC GRAW HILL EDUCATION, v. 1, 2014.

MIGUEL, P. A. C. **Qualidade. Enfoques e Ferramentas**. 1º. ed. São Paulo: Artliber, v. 1, 2001.

MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N. L. **TPM TPM à moda brasileira**. 1. ed. São Paulo: Makron books, v. 1, 1994.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 4, n. 2, p. 1-16, Abril 2008. ISSN ISSN 1808-0448.

OTTO, K. N.; WOOD, K. L. **A Reverse Engineering and Redesign Methodology, Research in Engineering design**. 4. ed. Austin: Product Evolution, v. 10, 1998.

PADDOCK, B. **Top management's: Guide to World Class Manufacturing**. 1. ed. Kansas: Buker Inc, v. 1, 1993.

PETRÓ, F.; SANTIN, C. K. Desenvolvimento e caracterização de espuma poliuretânica à base de difenilmetano diisocianato (MDI e óleo de linhaça. **01.07.2021**, São Leopoldo, 01 Julho 2021. 12.

RAJA, V.; FERNANDES, K. J. **Reverse Engineering An Industrial Engineering**. 1nd. ed. LONDON: SPRINGER, v. 1, 2008.

SHINGO, S. **O sistema toyota de produção**. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, v. 1, 1996.

- SIGMA. Sigma Tools. **Sigma Tools**, 2021. Disponível em: <<https://www.sigmatools.com.br/site/arquivos/vista-explodida/MXT-0111%20-%20Parafusadeira%201-4%20VE.pdf>>. Acesso em: 15 Abril 2023.
- SILVA, S. R.; MEDEIROS, J. T. O ciclo PDCA como ferramenta para alcançar a eficiência e eficácia na gestão da manutenção. **Congresso Brasileiro de manutenção e gestão de ativos**, Santos, 2014.
- SIMÃO, I. T. **Engenharia Reversa e Prototipagem**. 1nd. ed. São Paulo: Saraiva, v. 1, 2021.
- SWISS Steel Group. **Swiss Steel**, 2023. Disponível em: <<https://www.swisssteel-international.com.br/home>>. Acesso em: 25 Maio 2023.
- VILAR, W. D. **QUÍMICA E TECNOLOGIA DOS POLIURETANOS**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: VILAR CONSULTORIA, v. 1, 1999.
- VOSS, C. A. **Just-in-time manufacture**. 1. ed. Michigan: IFS (Publications), v. 1, 1987.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DÉCOURT, F. H. D. M. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 4ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher, v. Único, 2004.
- WANG, W. **REVERSE ENGINEERING - TECHNOLOGY OF REINVENTION**. 1nd. ed. FLORIDA: CRC PRESS, v. 1, 2011.
- WONG, R. **MASTERING REVERSE ENGINEERING**. 1nd. ed. BIRMINGHAM: PACKT PUBLISHING LTD., v. 1, 2018.
- YAMASHINA, H. Challenge to world-class-manufacturing. International Journal of Quality - Reliability Management. **Internacional Journal of Quality & Reliability Management**, Kyoto, v. 17, n. 2, p. 132 - 143, 10 Janeiro 2000. ISSN 0265-671X.