

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Autor: Renato de Souza Cicero

**Tratamento Superficial KTL na Tubulação  
de Alumínio da Saída de Água dos Motores  
Diesel**

Campinas, 2010.

**Nome do Autor: Renato de Sousa Cícero**

# **Tratamento Superficial KTL na Tubulação de Alumínio da Saída de Água dos Motores Diesel**

Dissertação de mestrado profissional  
apresentada à comissão de Pós Graduação da  
Faculdade de Engenharia Mecânica, como  
requisito para a obtenção de Mestre em  
Engenharia Automobilística

Área de Concentração: Materiais

Orientador: Eugênio Jose Zoqui

Campinas

2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C485t                      Cícero, Renato de Sousa  
Tratamento superficial KTL na tubulação de alumínio  
da saída de água dos motores diesel / Renato de Sousa  
Cícero. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Eugênio José Zoqui.  
Dissertação de Mestrado (Profissional) -  
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Mecânica.

1. Água - Tubulação. 2. Alumínio - Tubulação. 3.  
Proteção catódica. 4. Eletrodeposição. I. Zoqui,  
Eugênio José. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Treatment superficial KTL in pipe aluminum output water of  
diesel engines

Palavras-chave em Inglês: Water - Pipes, Aluminum - Pipes, Cathodic protection,  
Electrodeposition

Área de concentração: Materiais

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Célia Marina Alvarenga Freire, Claudio Kiyoshi Umezu

Data da defesa: 08/07/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Dissertação de Mestrado Profissional

**Tratamento Superficial KTL na Tubulação  
de Alumínio da saída de Água dos motores  
Diesel.**

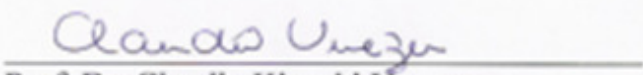
Autor: Renato de Sousa Cícero

Orientador: Eugênio Jose Zoqui

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
Prof. Dr. Eugênio José Zoqui  
Instituição: DEF / FEM / UNICAMP

  
Prof.ª. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire  
Instituição: DEMA / FEM / UNICAMP

  
Prof. Dr. Claudio Kiyoshi Umezu  
Instituição: FEAGRI / FEAGRI / UNICAMP

Campinas, 08 de Julho de 2010

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho á:

Minha esposa Edenilse da Silva Cícero, pela compreensão dos momentos ausentes e pela colaboração constante nas profinguas opiniões.

Ao nosso filho Leonardo Idalgo Cícero, tradução mais simples e sólida do fruto do amor puro e verdadeiro

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto a minha homenagem:

A “Deus” que me orienta nas minhas escolhas e caminho a seguir;

A minha esposa Edenilse da Silva Cícero e filho Leonardo Idalgo Cícero pelo amor e compreensão;

Aos colegas de trabalho que me ajudaram na realização deste trabalho;

Ao meu orientador Prof. Dr. Eugênio Zoqui que sempre me incentivou e mostrou os caminhos a serem seguidos durante a execução deste trabalho;

A Professora Dra Célia Marina de Alvarenga Freire que me direcionou nas minhas pesquisas sobre a anodização:

A Professora Dra Kátia Lucchesi Cavalga Dedini que me direcionou nas minhas pesquisas sobre análise de falhas:

A empresa que atualmente estou trabalhando e que sempre me deu oportunidade de estudo e incentivo para a realização deste mestrado em Engenharia Automobilística;

A todos os professores e colegas do departamento, que me ajudaram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho;

A Claudenete do laboratório de mecânica da Unicamp que realizou as análises no Microscópio Eletrônico de Varredura;

E finalmente, aos meus pais que sempre me incentivaram para os meus estudos.

‘Todo conhecimento inicia-se na  
imaginação, no sonho; só depois desce  
à realidade material e terrena por meio  
da lógica’

Albert Einstein

## Resumo

As tubulações de alumínio de saída de água dos motores diesel estão apresentando cavitação, devido ao seu design. Atualmente a tubulação de alumínio de saída de água recebe a anodização dura, porém a liga Al – Si – 10 Mg não é favorável a anodização por ter o silício. O silício, por sua vez, dificulta a formação da camada de óxido e com isso a camada de anodização não será uniforme, principalmente na região interna da tubulação de água. A camada de anodização está sendo mal depositada devido ao processo ser manual e com isso as tubulações de água que apresentaram cavitação foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura, a fim de caracterizar a espessura da camada anodizada. Observou-se comparativamente que a camada de anodização não é uniforme. A pintura KTL é um tratamento superficial que consiste em um processo de três etapas, sendo a primeira de um pré-tratamento: desengraxe, lavagem, decapagem e fosfatização. A segunda é a Pintura Eletroforética Catódica (KTL) e por último a terceira que é a cura acelerada em estufa com temperatura e tempo controlado. A pintura KTL foi realizada pela teoria da eletroquímica que se subdivide em quatro fenômenos: Eletrólise, Eletroforese, Eletrocoagulação e por fim a eletroosmose. Na análise realizada comparativamente a camada de KTL é uniforme em toda a extensão da tubulação de alumínio de saída de água dos motores Diesel. Com este resultado comparativo, a pintura KTL se faz necessária na tubulação de alumínio (Al – Si – 10 Mg) de saída de água dos motores Diesel para que se minimize o efeito da cavitação.

Palavras Chaves: Pintura KTL, Tratamento Superficial em Al-Si, Tubulação de Água em Alumínio

## **Abstract**

The pipes aluminum water outlet of the diesel engines is experiencing cavitation, due to its design. currently, aluminum pipe water outlet receives the hard anodized, but the Al - Si - Mg 10 is not favorable to have the anodizing because silicio. The silicio, in turn, hinders the formation of the oxide layer and thus the layer of anodizing is not uniform, especially in the inner water pipe. Water pipes that had cavitation were examined in a scanning electron microscope in order to characterize the thickness of the anodized layer. It was noted that the comparatively anodizing layer is not uniform. KTL painting is a surface treatment that consists of a three-step process, the first being a pre-treatment: degreasing, washing, pickling and phosphating. The second is the Cathodic Electrophoretic Painting (KTL) and finally the third which is accelerated healing in a greenhouse with controlled temperature and time. KTL painting was done by the theory of electrochemistry which is divided into four phenomena: Electrolysis, Electrophoresis, Electro coagulation and finally the electroosmosis. In the analysis performed compared to KTL layer is uniform throughout the length of aluminum pipe water outlet of diesel engines. With this result comparison, KTL painting is needed in the tubing of aluminum (Al - Si - 10 Mg) output of diesel engines for water to minimize the effect of cavitation.

**Key Words:** KTL Painting, Surface Treatment in Al-Si, Pipe of Water in Aluminum

## Sumário

|     |                                                                    |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | INTRODUÇÃO                                                         | 01 |
| 2.  | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA                                              | 03 |
| 2.1 | - Sistema de Arrefecimento a Ar                                    | 03 |
| 2.2 | - Sistema de Arrefecimento a Água                                  | 04 |
| A   | - Bomba de Água                                                    | 06 |
| B   | - Resfriador de Óleo                                               | 06 |
| C   | - Bloco do Motor                                                   | 06 |
| D   | - Cabeçote do Motor                                                | 06 |
| E   | - Válvula Termostática                                             | 07 |
| F   | - Radiador                                                         | 07 |
| G   | - Líquido de Arrefecimento                                         | 08 |
| H   | - Tubulação de Água                                                | 09 |
| 2.3 | - Processo de Anodização                                           | 10 |
| A   | - Processo de Selagem                                              | 16 |
| B   | - Anodização em Ligas de Alumínio                                  | 17 |
| C   | - Influência dos Elementos de Ligas na Anodização                  | 17 |
| D   | - Efeitos das Partículas de Si no Processo de Anodização           | 18 |
| E   | - Processo de Anodização Dura                                      | 19 |
| 2.4 | - Processo de Pintura KTL                                          | 19 |
| A   | - Cataforese de Alta Espessura                                     | 24 |
| 2.5 | - Medidas de Dureza                                                | 26 |
| 2.6 | - Confiabilidade                                                   | 27 |
| A   | - Classificação de Falhas                                          | 27 |
| B   | - Função da Taxa de Falhas                                         | 29 |
| C   | - Método PDCA                                                      | 31 |
| D   | - Análise do Modo de Falhas                                        | 32 |
| 2.7 | - Taxa de Falha da Tubulação de Água com Tratamento Anodizado Dura | 33 |

|     |                                                          |    |
|-----|----------------------------------------------------------|----|
| 2.8 | - Cavitação                                              | 36 |
| 3.  | MÉTODO DE TRABALHO                                       | 38 |
| 3.1 | - Perfil da Empresa                                      | 38 |
| 3.2 | - Composição Química                                     | 41 |
| 3.3 | - Caracterização das Amostras                            | 42 |
| 3.4 | - Caracterização por Microscópio Ótico                   | 42 |
| 3.5 | - Fluorescência de Raios – X                             | 42 |
| 3.6 | - Caracterização por Microscópio Eletrônico de Varredura | 44 |
| 3.7 | - Medição de Dureza                                      | 44 |
| 3.8 | - Diagrama de Causa e Efeito                             | 45 |
| 4.  | RESULTADO E DISCUSSÃO                                    | 47 |
| 4.1 | - Classificação da Falha                                 | 47 |
| 4.2 | - Estratificação do Modo de Falha Cavitação              | 47 |
| 4.3 | - Resultado da Avaliação do Diagrama de Causa e Efeito   | 52 |
| A   | - Diagrama de Causa e Efeito – Medida                    | 52 |
| B   | - Diagrama de Causa e Efeito – Método                    | 53 |
| C   | - Diagrama de Causa e Efeito - Mão de Obra               | 53 |
| D   | - Diagrama de Causa e Efeito – Maquina                   | 54 |
| E   | - Diagrama de Causa e Efeito - Meio Ambiente             | 54 |
| F   | - Diagrama de Causa e Efeito – Material                  | 55 |
| 4.4 | - Ensaio de Fluorescência de Raios – X                   | 55 |
| 4.5 | - Ensaio do Microscópio Ótico                            | 56 |
| 4.6 | - Ensaio do Microscópio Eletrônico de Varredura          | 58 |
| 4.7 | - Análise de FMEA de Processo                            | 63 |
| 5.  | CONCLUSÃO                                                | 64 |
| 5.1 | - Resultados                                             | 64 |
| 5.2 | - Propostas para Futuros Trabalhos                       | 65 |
|     | Referencias                                              | 66 |
|     | Anexos                                                   | 73 |

## Listas de Figuras

|               |                                                                     |    |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1    | Motor com Sistema de Arrefecimento a Ar                             | 03 |
| Figura 2.2    | Motor com Sistema de Arrefecimento a Água                           | 05 |
| Figura 2.3    | Radiador de um Sistema de Arrefecimento a Água                      | 08 |
| Figura 2.4    | Tubulação de Água                                                   | 09 |
| Figura 2.5    | Detalhe da Conexão da Tubulação de Água                             | 10 |
| Figura 2.6    | Barreira de um Óxido                                                | 12 |
| Figura 2.7    | Esquema da formação de íons $O^{2-}$ e $OH^-$ na camada de barreira | 12 |
| Figura 2.8    | Representação do transporte dos íons através da camada barreira     | 13 |
| Figura 2.9    | Representação da dissolução do óxido de alumínio                    | 14 |
| Figura 2.10   | Concepção Artística do Corte de uma Camada Porosa de Óxido          | 15 |
| Figura 2.11   | Micrografia ótica da secção transversal da liga Al-Si               | 18 |
| Figura 2.12.1 | Processo de Pintura Anódica                                         | 21 |
| Figura 2.12.2 | Processo de Pintura Catódica                                        | 22 |
| Figura 2.13   | Processo de Eletrodeposição Catódica                                | 23 |
| Figura 2.14   | Classificação das Falhas                                            | 28 |
| Figura 2.15   | Curva da Banheira para Componentes Eletrônicos                      | 30 |
| Figura 2.16   | Curva da Banheira para Componentes Mecânicos                        | 31 |
| Figura 2.17.1 | Tubulação de Água lado Cabeçote                                     | 34 |
| Figura 2.17.2 | Tubulação de Água lado Superior                                     | 34 |
| Figura 2.17.3 | Tubulação de Água lado Veículo                                      | 34 |
| Figura 2.17.4 | Tubulação de Água lado Inferior                                     | 34 |
| Figura 2.18.1 | Tubulação de Água com Falha de Campo                                | 35 |
| Figura 2.18.2 | Tubulação de Água com Falha de Campo                                | 36 |
| Figura 3.1    | Evolução dos Motores                                                | 38 |
| Figura 3.2    | Gráfico de Estratificação do Modo Vazamento de Água                 | 40 |
| Figura 3.3.1  | Detalhamento do PDCA – Parte 1                                      | 41 |
| Figura 3.3.2  | Detalhamento do PDCA – Parte 2                                      | 43 |
| Figura 3.3.3  | Detalhamento do PDCA – Parte 3                                      | 44 |

|               |                                                      |    |
|---------------|------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.3.4  | Detalhamento do PDCA – Parte 4                       | 45 |
| Figura 3.4    | Diagrama Causa & Efeito                              | 47 |
| Figura 4.1    | Classificação da Falhas                              | 47 |
| Figura 4.2    | Estratificação do Modo de Falha pelo Local de Reparo | 48 |
| Figura 4.3    | Estratificação do Modo de Falha por Aplicação        | 49 |
| Figura 4.4    | Estratificação do Modo de Falha por Região           | 49 |
| Figura 4.5    | Estratificação do Modo de Falha por Data de Venda    | 50 |
| Figura 4.6    | Estratificação do Modo de Falha por Quilometragem    | 51 |
| Figura 4.7    | Diagrama Causa & Efeito                              | 52 |
| Figura 4.8.1  | Área com Cavitação                                   | 57 |
| Figura 4.8.2  | Área sem Cavitação                                   | 57 |
| Figura 4.9    | Área sem Cavitação                                   | 58 |
| Figura 4.10.1 | Espessura da Camada da Anodização Dura               | 59 |
| Figura 4.10.2 | Análise da Camada da Anodização Dura                 | 60 |
| Figura 4.10.3 | Camada Anodização Dura vista de topo                 | 60 |
| Figura 4.11.1 | Análise da Camada da Pintura KTL                     | 61 |
| Figura 4.11.2 | Análise da Camada Pintura KTL                        | 62 |
| Figura 4.11.3 | Camada da Pintura KTL vista de topo                  | 63 |

## **Listas de Tabelas**

|            |                                                |    |
|------------|------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1 | Tipo de Reclamação                             | 39 |
| Tabela 4.1 | Composição Química da Liga Al-Si- 10 Mg (a) T6 | 56 |

## **Listas de Equações**

Equação 2.1 Cálculo da Dureza Vickers

26

## **Glossário**

### Lista de Siglas

|        |                                                  |
|--------|--------------------------------------------------|
| AACC   | - Amostra anodizada com cavitação;               |
| AASC   | - Amostra anodizada sem cavitação;               |
| AED    | - Pintura por Eletroforese;                      |
| AKTL   | - Amostra KTL;                                   |
| Al     | - Alumínio;                                      |
| B10    | - Vida B10, ou seja, representa 90% da produção; |
| CED    | - Pintura por Eletroforese;                      |
| cv     | - Potencia;                                      |
| Cu     | - Cobre;                                         |
| DEF    | - Departamento de Engenharia de Fabricação;      |
| DEM    | - Departamento de Engenharia Mecânica;           |
| DKTL   | - Pintura por Eletroforese;                      |
| HFBECE | - Pintura por Eletroforese;                      |
| HV     | - Dureza Vickers;                                |
| KTL    | - Pintura por Eletroforese;                      |
| LFBECE | - Pintura por Eletroforese;                      |
| Mg     | - Manganês;                                      |
| PDCA   | - Planejar, Desenvolver, Checa e Acompanhar;     |
| PFMEA  | - Análise do Modo e Efeito de Falha no Processo; |
| pH     | - Acidez da Água;                                |
| R/1000 | - Quantidade de falha dividida por 1000;         |
| Si     | - Silício;                                       |

## Lista de Unidades

|          |                                      |
|----------|--------------------------------------|
| $A/cm^2$ | - Densidade / centímetros quadrados; |
| g/ml     | - Grama / mililitros;                |
| mm       | - Milímetros;                        |
| nm       | - nanômetros;                        |
| nm/V     | - nanômetros / Volts;                |
| pH       | - % da acidez da água;               |
| V        | - Volts;                             |
| V/nm     | - Volts / nanômetro;                 |
| °C       | - Graus Celsius;                     |
| $\mu m$  | - Microns;                           |
| %        | - Porcentagem;                       |

### Letra Latinas

|   |                          |
|---|--------------------------|
| D | - Média das diagonais;   |
| P | - Carga do ensaio;       |
| R | - Quantidades de falhas; |
| T | - Tempo;                 |

## Letras Gregas

$\theta$  - Ângulo entre as faces opostas o diamante;

# 1 INTRODUÇÃO

Com a competitividade no setor industrial, particularmente no setor automobilístico, as empresas estão em constante transformação, isto faz com que estas busquem um melhor desempenho para que possa atender o mercado consumidor, que se mostra cada vez mais exigente, oferecendo qualidade agregada a considerável redução de custo de produto. Mudanças no âmbito tecnológico surgem com o intuito da obtenção de materiais em condições de aplicações críticas. Uma grande preocupação diz respeito à proteção contra a cavitação, além da preocupação com as melhorias nas propriedades mecânicas.

Para as empresas montadoras de motores, tais aspectos surgem logo no início do desenvolvimento de um novo produto, pois, devido à demanda de mercado, o tempo para lançamento de novos produtos está cada vez mais reduzido. Com essa condição, os engenheiros precisam desenvolver procedimentos e metodologias de forma a minimizar o custo e o tempo para homologação de novos e ou alteração dos componentes que estão atualmente em produção.

Como a tubulação de água atualmente está em produção e sendo comercializada em alta escala, aproximadamente 7000 peças por mês e além de ter uma geometria interna de difícil acesso para o controle de camada aplicada à superfície. Este trabalho tem por sua vez de minimizar o problema de cavitação da tubulação de água sem impactar a produção devido a isso optou-se pelo estudo da proteção superficial anodização.

Por vez, os clientes estão exigindo produtos com bom rendimento, qualidade, desempenho, manutenção fácil e principalmente baixo custo para reposição.

Sabe-se que o problema da tubulação de água é a cavitação e para atacar a causa raiz, deve-se atuar no design/ geometria da tubulação e o estudo realizado neste trabalho não foi de atuar na causa raiz. Porque para se atuar na causa raiz deve-se realizar estudos de designs, verificando cada proposta de design através de simulações, porém este estudo iria demandar tempo e elevado custo para cada proposta de design e conseqüentemente a construção de um novo ferramental de fundição da tubulação de água.

Este trabalho tem como objetivo propor uma nova proteção superficial para minimizar o problema de cavitação, sem impactar a produção e atender a vida B10 dos motores no período e

garantia. Serão apresentados os resultados da Pintura KTL comparada com anodização dura aplicada na tubulação de água.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sistema de arrefecimento é responsável pela troca do calor gerado pelo motor com o ar ou o líquido de arrefecimento. Este calor é gerado pela combustão interna do motor. A seguir demonstraremos os 2 sistemas de arrefecimento para motores:

### 2.1 - Sistema de Arrefecimento a Ar:

Este sistema de refrigeração é baseado na colocação de partes mecânicas no fluxo de ar gerado pelo movimento do veículo, aproveitando os aspectos aerodinâmicos. A Figura 2.1 demonstra que as aletas ou nervuras que estão próximas da área de combustão do motor aumentam a superfície metálica em contato com o ar, desse modo, auxiliam a dissipação térmica do calor gerado pela combustão do motor. Este calor é dissipado com a corrente de ar que passa entre as aletas devido ao veículo estar em movimento, o próprio ar refrigera o motor (GOODSELL, 1995).

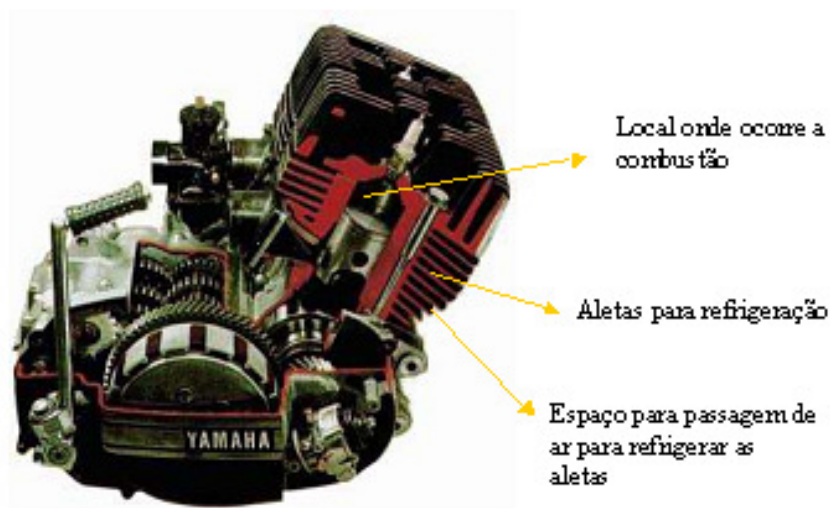


Figura 2.1 – Motor com sistema de arrefecimento a ar (GOODSELL, 1995).

**Vantagens:**

- Motor mais leve;
- Menor numero de componentes responsável pela correta refrigeração do motor quanto comparada com o sistema de arrefecimento a água.
- Baixa manutenção;
- Baixo custo de manutenção.

**Desvantagens:**

- Não se obter arrefecimento com o veículo parado, provocando maiores dilatações das peças mecânicas por aquecimento, provocando ciclos de expansão / contração mais severas;
- Vida útil menor;
- Necessitam sempre de fluxo de ar;
- Motor trabalha sem controle de temperatura.

O Sistema de arrefecimento dos motores é responsável em controlar a temperatura do motor. No início do desenvolvimento dos motores existia somente a preocupação de se dissipar o calor gerado pelo motor, mas com o desenvolvimento da eletrônica embarcada nos veículos e no motor, a temperatura de trabalho passou a ser um requisito mandatório, ou seja, o motor terá maior durabilidade, menor desgaste e atrito, maior economia de combustível, menos manutenção, emitirá menos poluente e aumentará seu desempenho. Para atender a esta nova demanda, preferencialmente utiliza-se o sistema de arrefecimento com refrigeração a água (JUNIOR, 2002).

**2.2 - Sistema de Arrefecimento a Água:**

Este sistema de refrigeração é baseado na utilização de água (líquido de arrefecimento) para refrigerar o motor, este sistema consiste em um sistema fechado de água que circula através de canais no bloco e cabeçote do motor, onde a água absorve o calor, um trocador ou radiador onde a água libera o calor para o ar.

Conforme mostrado na Figura 2.2, o motor é o componente principal do sistema, pois ele é o gerador de calor. A água (líquido de arrefecimento) circula pelas galerias internas, ou seja,

entra na parte inferior do bloco, passa pelo intercambiador de óleo, refrigerando o óleo, sobe para as regiões dos cabeçotes e passa pela tubulação de água até a válvula termostática e retorna para o radiador na parte superior (JUNIOR, 2002).

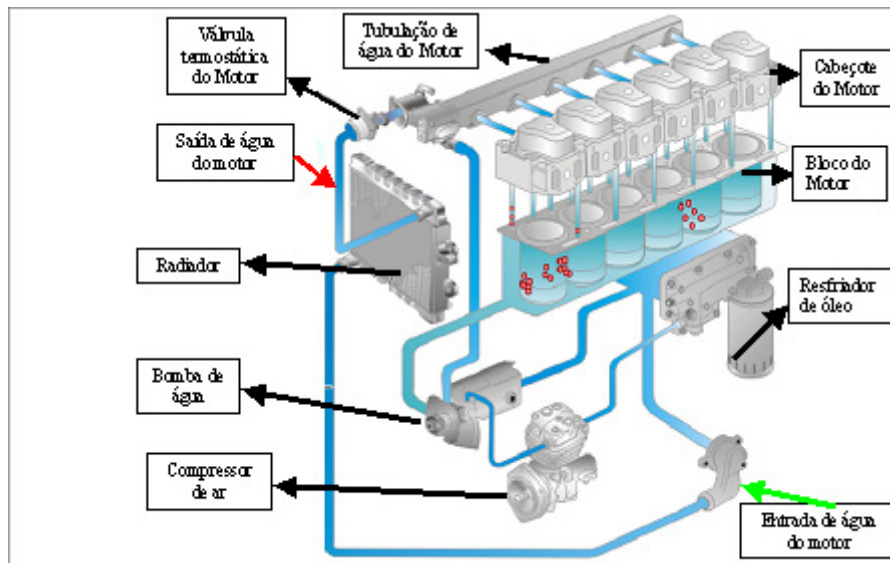


Figura 2.2 – Motor com sistema de arrefecimento a água (JUNIOR, 2002).

#### **Vantagens:**

- Controle da temperatura do líquido de arrefecimento;
- Melhor rendimento térmico do motor;
- Maior durabilidade do motor;
- Motor atinge a temperatura de trabalho mais rápido.

#### **Desvantagens:**

- Necessita de revisão no sistema de arrefecimento;
- Custo de manutenção;
- Motor não funciona sem o líquido de arrefecimento;
- Sistema mais pesado.

Os principais componentes mostrados na Figura B têm função específica de garantir o correto funcionamento deste sistema de arrefecimento com refrigeração a água.

### **A - Bomba de Água:**

A bomba de água tem como função auxiliar o deslocamento da água (líquido de arrefecimento) no sistema, ou seja, recalca o líquido do radiador para o motor, fazendo com que haja uma troca do líquido aquecido pelo resfriado. Mesmo se não houvesse a presença da bomba, o líquido iria circular por termofissão (a diferença de temperatura provocaria o movimento). A bomba é um dispositivo que melhora essa circulação (GOODSELL, 1995).

### **B - Resfriador de Óleo:**

O resfriador de óleo tem como função refrigerar o óleo do motor, para que não ocorra a degradação do óleo do motor por temperatura. O fluxo de água (líquido de arrefecimento) que vem da bomba de água passa pelo resfriador de óleo, ou seja, o óleo do motor passa por um circuito de placas que troca o calor com a água (líquido de arrefecimento) do motor mantendo a temperatura especificada pelo fabricante (GOODSELL, 1995).

### **C - Bloco do Motor:**

O bloco do motor com o sistema de arrefecimento a água tem canais e ou galerias de água que estão próximas da área de combustão do motor e desse modo auxiliam a dissipação térmica do calor gerado pela combustão do motor. Este calor é dissipado com o fluxo de água que passa pelos canais e ou galerias (GOODSELL, 1995).

### **D - Cabeçote do Motor:**

O cabeçote do motor com o sistema de arrefecimento a água também tem canais de água. Estes canais de água do cabeçote têm a função de melhorar a eficiência da passagem de água do bloco do motor para a tubulação de água. Como o cabeçote tem os canais de água que fazem a interface do bloco com a tubulação, o circuito de entrada de água (líquido de arrefecimento) é feito pela parte inferior e a saída pela parte superior fazendo com que todo o fluxo de água (líquido de arrefecimento) passe pelo bloco do motor (GOODSELL, 1995).

#### **E - Válvula Termostática:**

A válvula termostática é responsável pelo controle de temperatura da água do motor e o rápido aquecimento do mesmo, quando frio. É uma válvula que se abre e fecha, permitindo ou não a passagem da água (líquido de arrefecimento), ou seja, bloqueia ou desvia o líquido, para não passar pelo radiador enquanto o motor não estiver na temperatura de trabalho (cada fabricante tem a sua especificação). Quando o motor estiver na sua temperatura de trabalho, a válvula se abre permitindo a passagem do líquido para o radiador e com isso o líquido resfria o interior do motor, baixando sua temperatura. Quando o motor não estiver na sua temperatura de trabalho a válvula estará fechada. Com isso não ocorrerá a troca de calor, fazendo com que o líquido que está no motor sofra um rápido aquecimento para que o motor atinja a sua temperatura ideal de trabalho (JUNIOR, 2002).

#### **F - Radiador:**

O radiador tem a função de trocar o calor no sistema. Conforme mostrado na Figura 2.3, o radiador possui dois dutos principais: entrada do líquido aquecido (parte superior) e saída do líquido resfriado (parte inferior). É importante que suas aletas se mantenham limpas, para não dificultar a passagem do líquido de arrefecimento. O líquido aquecido proveniente do motor, ao passar pelos dutos do radiador sofre um resfriamento devido à circulação de ar pelas suas aletas. O líquido resfriado retorna novamente para o motor (GOODSELL, 1995), (JUNIOR, 2002).

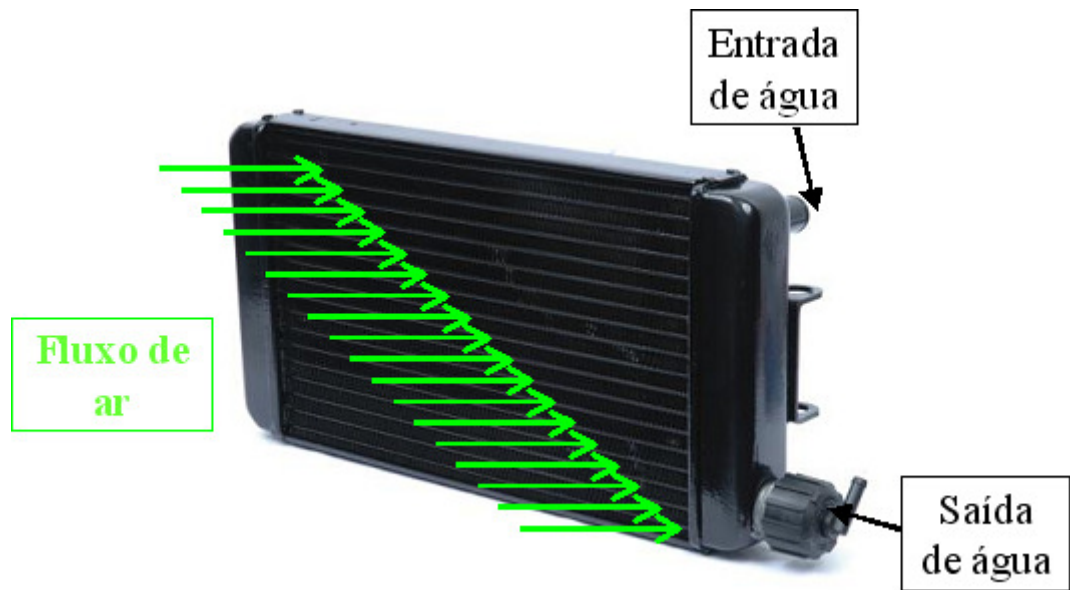


Figura 2.3 – Radiador de um sistema de arrefecimento a água (JUNIOR, 2002).

Para o correto funcionamento do sistema de arrefecimento à água, a temperatura do líquido de arrefecimento do motor deve ser controlada. Para se manter esta temperatura ideal de trabalho o radiador precisa de um ventilador para controlar a sua temperatura, mesmo com o veículo parado a temperatura deve ser a ideal, para resolver este problema, o ventilador do radiador do motor é conhecido como ventoinha, assim como termostato, a ventoinha precisa operar de modo a permitir ao motor manter uma temperatura ideal de trabalho. As ventoinhas são controladas por um interruptor termostático ou pela central eletrônica do motor e são ligadas quando a temperatura do líquido de arrefecimento atinge a temperatura definida, e desligada quando atinge temperatura definida (cada fabricante de veículo tem a sua especificação).

#### **G - Líquido de Arrefecimento (água do motor):**

O líquido de arrefecimento é constituído por água e aditivos e tem a função de transferir o calor gerado do motor para o radiador. No entanto, o calor gerado em alguns pontos do motor propicia a mudança no estado do fluido. Quando a água muda de estado físico, suas propriedades também são alteradas e ela deixa de ser útil para o sistema de arrefecimento. Uma das alternativas encontradas para que o ponto de ebulição da água fosse aumentado é a utilização de tampas de reservatório com válvulas calibradas, no entanto, apenas as tampas não são capazes de manter o

sistema estável. Por esse motivo, o aditivo também tem a importante função de modificar o ponto de ebulição e congelamento da água, o que garante o bom funcionamento do motor (Junior, 2002). Esses aditivos têm por finalidade equilibrar o pH da água, não a deixando nem alcalina e nem ácida. O etilenoglicol é o principal componente do aditivo. Esse elemento altera os pontos de ebulição e congelamento da água, fazendo com que a mesma ferva acima de 100°C e congele somente abaixo de 0°C. Outra função do aditivo é a de manter lubrificado todo o sistema e evitar o acúmulo de sujeira no mesmo.

#### **H - Tubulação de Água do Motor:**

A tubulação de água do motor tem como função receber o fluxo de água dos cabeçotes e canalizar até a válvula termostática. Neste momento é que se encontra a máxima temperatura da água, pois a água já refrigerou o motor por completo conforme mostrado na Figura 2.4.



Figura 2.4 – Tubulação de água (MWM, 2009).

Como mostrado na Figura 2.5, o regime do líquido de arrefecimento é turbulento devido ao fluxo e a geometria da tubulação de água, pois está vindo do fluxo do cabeçote e entra na tubulação de água para retornar para o radiador. O fluxo de água da tubulação de água é do 1º cilindro para o 4º cilindro do motor.

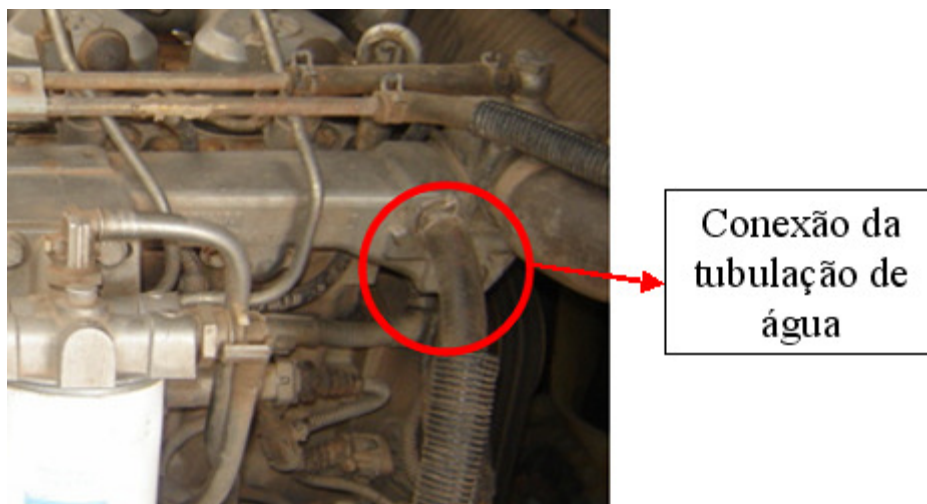


Figura 2.5 – Detalhe da conexão da tubulação de água (MWM, 2009).

A Figura 2.5 mostra a conexão de saída de água da tubulação de água para o radiador do motor, e observa-se também que a tubulação de água tem a função de fixar o filtro de combustível do motor. A tubulação de água tem o tratamento superficial de anodização dura.

### 2.3 - Processo de Anodização:

Anodização é o processo de criar um filme de óxido sobre certos metais por meio da imersão em um banho eletrolítico no qual o metal a anodizar é ligado ao pólo positivo de uma fonte de eletricidade, transformando-se no anodo da cuba eletrolítica. Certos metais como alumínio, nióbio, tântano, titânio, tungstênio, zircônio tem resultados característicos de formação de camada de óxido. Outros metais podem ser usados como anodo em banhos eletrolíticos para se obter tratamentos superficiais específicos, mas o crescimento de uma camada de óxido conforme descrito aqui é característico dos metais citados. A anodização de ligas metálicas depende muito da sua composição, por exemplo, ligas de alumínio para fundição têm bastante silício, que dá fluidez para o bom preenchimento dos moldes, mas dificulta a uniformidade da camada de anodização (ROBERT, 2002).

No caso do alumínio o processo de anodização promove a formação de duas subcamadas: a camada barreira e a camada porosa. A camada barreira forma-se adjacente ao substrato e em seguida inicia-se o crescimento da camada porosa. A espessura da camada barreira depende da tensão aplicada no processo de anodização e varia de 10 a 40 nm. A espessura da camada porosa

depende da tensão utilizada no crescimento da camada anódica e da agressividade do eletrólito (THOMPSON, 1999).

Metais que podem ser anodizados também reagem prontamente com o oxigênio do ar (oxidam), portanto suas superfícies estão sempre cobertas com uma camada fina de óxido. No alumínio, existe sempre uma barreira de óxido de cerca de 2 a 3 nm ( $1\text{nm} = 0,000\ 001\text{mm}$ ) de espessura. Esta barreira estabiliza a superfície, impedindo que a oxidação continue. Esta camada é também um excelente isolante elétrico, suportando um campo elétrico da ordem de 1 V/nm, ou seja, um milhão de volts por milímetro. Quando uma peça de alumínio é colocada como anodo em uma célula eletrolítica contendo, digamos, um borato, não há fluxo significativo de corrente elétrica até se atingir entre 1 e 2 volts (ROBERT, 2002).

Somente quando o campo elétrico supera a capacidade de isolamento desta camada de óxido é que os íons de oxigênio e alumínio começam a percorrer o óxido. Esta corrente dentro do óxido é uma corrente iônica e estes íons reagem para formar a camada mais espessa de óxido. O processo de condução de íons através da camada de óxido sob altos campos elétricos é de fundamental importância para a Anodização (ROBERT, 2002).

Os ânions e oxigênio se direcionam para a camada de óxido, indo até a interface óxido-metal para reagir com o alumínio e formar óxido na superfície do metal. Os cátions de alumínio se direcionam para a interface óxido-eletrólito onde reagem com a água para formar óxido naquela superfície (ROBERT, 2002). Os óxidos se formam em ambas as interfaces. A taxa de formação de óxido é proporcional a densidade da corrente ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ). O campo elétrico no óxido não se altera com a mudança na espessura da camada de óxido, e tem apenas uma pequena dependência da densidade de corrente e da temperatura (ROBERT, 2002).

Enquanto a camada de óxido ganha espessura, a tensão através do óxido aumenta proporcionalmente e, à temperatura ambiente, é próxima de 1,2 nm/V. A espessura da camada é muito uniforme porque em toda a superfície a queda de tensão deve ser a mesma (ROBERT, 2002). Para cada composição de banho e temperatura, existe uma máxima tensão que pode ser suportada antes de ocorrer a ruptura. A maior tensão obtida em eletrólitos aquosos é de cerca de 1000 V. neste ponto, a espessura da barreira de óxido é cerca de 1  $\mu\text{m}$  (0,001mm), ou seja, 300 a 500 vezes mais espessa que o óxido inicial gerado pelo oxigênio do ar ambiente mostrado na Figura 2.6.

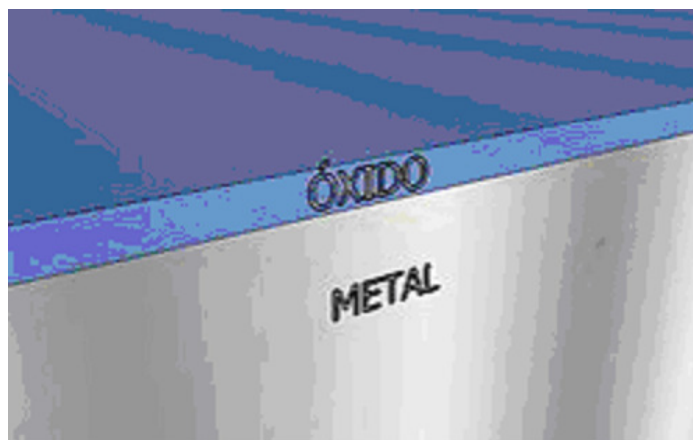


Figura 2.6 – Barreira de um óxido (ROBERT, 2002).

A Figura 2.7 descreve a formação da camada de óxido para um Al 999,99%. A ligação existente entre o O-H na molécula de água favorece a remoção do átomo de oxigênio. Se apenas um hidrogênio da molécula de água se desprender e se unir ao ácido gera o ânion  $\text{OH}^-$ , contudo se dois átomos de hidrogênio da molécula de água se desprender forma-se o ânion  $\text{O}^{2-}$ .

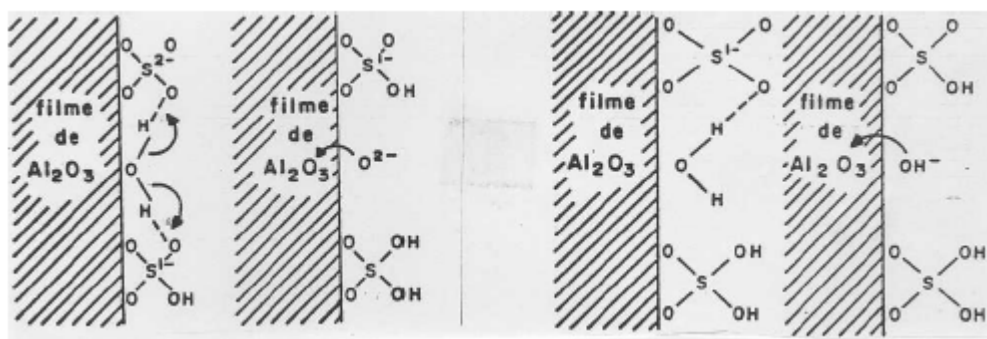


Figura 2.7 – Esquema da formação de íons  $\text{O}^{2-}$  e  $\text{OH}^-$  na camada de barreira, (PEDROSO, 1987).

Davies e outros cientistas definiram que os íons atravessam a camada de óxido, ocorrendo à migração de espécie  $\text{Al}^{+3}$  e de íons  $\text{O}^{2-}$  e  $\text{OH}^-$ , (DAVIS, 1963 e PEDROSO, 1987), descreveram somente os movimentos dos ânions. A direção de migração das espécies está esquematizada na Figura 2.8 a seguir, onde a taxa de migração dependerá da liga de Al, da densidade da corrente e do eletrólito utilizado, (DAVIES, 1963).

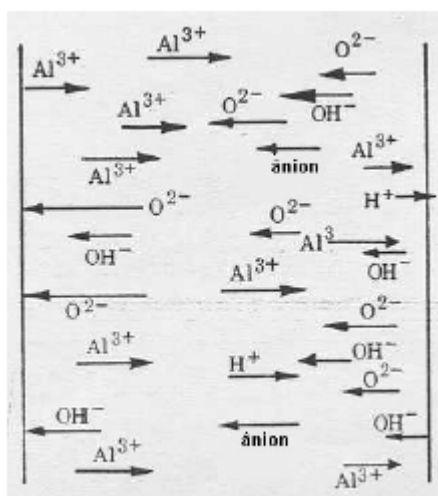


Figura 2.8 – Representação do transporte dos íons através da camada barreira, (WOOD, 1970)

Sempre que uma camada de óxido apresenta uma porosidade mais elevada é porque sofreu uma dissolução pelo eletrólito. Este processo surge pela dissolução química, que na base do poro é auxiliada pelo campo elétrico. Para o caso do óxido de alumínio, um mecanismo proposto para explicar o crescimento da camada é pelo rompimento da ligação Al-O. O campo elétrico na interface óxido/eletrólito atua na dissolução do óxido de alumínio, conforme mostrada na Figura 2.9 a seguir. Na Figura 2.9(a) não há campo elétrico no filme. Na Figura 2.9(b) ocorre a polarização nas ligações moleculares. Próximo á camada da barreira ocorrerá o aumento da força de ligação entre o Al-O, pelo fato do campo elétrico tender a atrair íons  $O^{2-}$  e a liberar os íons  $Al^{+3}$  para a solução. Entre a figura 2.9(c) e Figura 2.9(d) ocorrerá a solvatação dos íons  $Al^{+3}$  pelas moléculas de água e os íons  $O^{2-}$  serão retirados pelos íons  $H_3O^+$  onde haverá a formação de água, (WOOD, 1970 e PEDROSO, 1987).

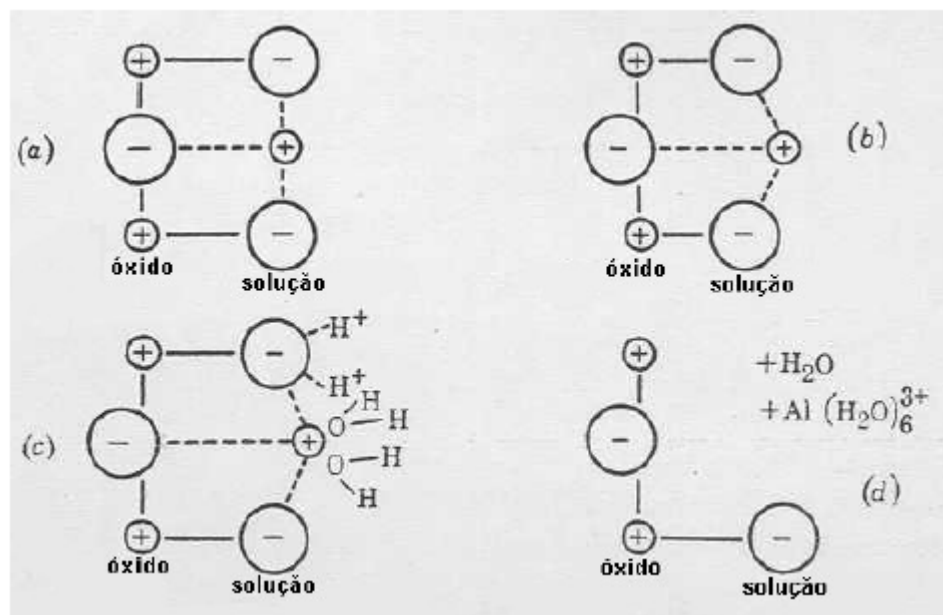


Figura 2.9 – Representação da dissolução do óxido de alumínio.  
 (a) antes da polarização (b) após a polarização (c) remoção dos íons  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{O}^{2-}$  (d) óxido restante, (WOOD, 1970).

Cabe notar que alguns tratamentos usam correntes alternadas para obter seus resultados. A composição do banho é que determina se ocorrerá a formação de uma barreira de óxido ou de uma camada porosa de óxido. A barreira de óxido se forma em soluções quase neutras, onde o óxido de alumínio é quase insolúvel, sendo as mais comuns as de borato, fosfato ou tartrato de amônia. As camadas porosas de óxido se formam em eletrólitos ácidos, nos quais o óxido não só se deposita, mas também dissolve. A solução mais comum é a de ácido sulfúrico, tipicamente 10 a 20% em peso (1 a 2 gramas de ácido para 9 gramas de água, lembrando que a densidade do ácido sulfúrico é de 1,81g/ml). Este tipo de anodização tem uma corrente típica de 0,3 a 3 amperes por decímetro quadrado. Outros banhos para aplicações especiais podem ser feitos com ácido oxálico, ácido crômico, ácido fosfórico ou misturas de ácidos orgânicos e inorgânicos (ROBERT, 2002).

Uma característica comum a estes banhos de anodização é a capacidade de reter uma alta concentração de alumínio em solução. Isto é essencial, pois uma grande parte do alumínio que é oxidado não fica retido na camada de óxido, mas passa para a solução.

Filmes porosos de 100  $\mu\text{m}$  podem ser feitos facilmente. Isto é 100 vezes a espessura do filme de “barreira de óxido” mais espesso. Ao contrário da barreira de óxido, alta voltagem não é

necessária para fazer um filme mais espesso. Isto se deve ao tipo particular de estrutura dessas camadas. O óxido tem uma estrutura celular com um poro central em cada célula. As dimensões das células e dos poros dependem da composição do banho, da temperatura e da voltagem, mas o resultado é sempre uma alta densidade de poros finos. O diâmetro da célula é na faixa de 50 a 300 nm e o diâmetro dos poros fica entre 0,3 e 0,5 do diâmetro da célula (ROBERT, 2002).

Inicialmente, uma fina barreira de óxido se forma na base de cada poro. O caminho mais curto entre o metal e o eletrólito é através desta zona. Aí o campo é uniforme e tem valor máximo. Os ânions de oxigênio do eletrólito penetram na camada de óxido em direção a interface metal-óxido e lá se combinam com o alumínio, com isso ficando mais espesso a camada de óxido. Os cátions de alumínio são movidos pelo campo elétrico até o eletrólito no poro, onde passam à solução, portanto, a formação de óxido é limitada à interface metal-óxido na base do poro. A medida que o alumínio é oxidado, a interface metal-óxido se desloca para o interior do metal. A parede da célula e o poro aumentam em altura, isto é, o filme ficará mais espesso, enquanto a célula e o diâmetro do poro permanecem fixos como no exemplo da Figura 2.10. Uma vez que a barreira de óxido permanece com espessura constante no fundo do poro, a voltagem da célula e a corrente permanecem constantes enquanto o filme ganha espessura (ROBERT, 2002).

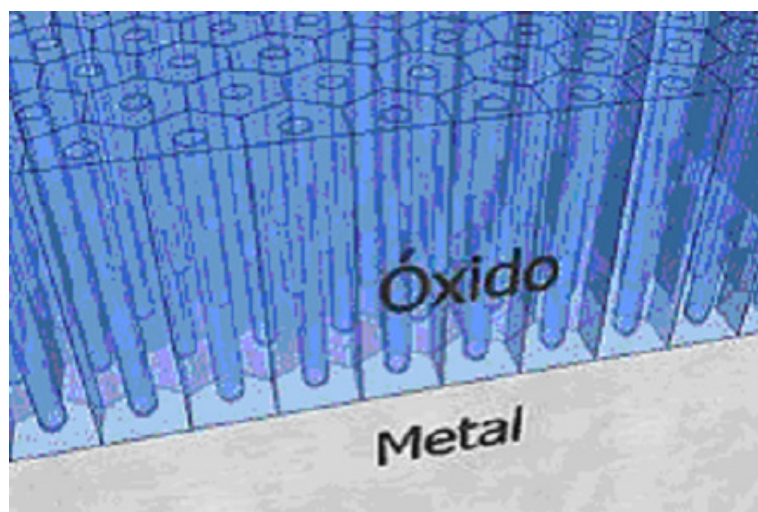


Figura 2.10 – Concepção artística do corte de uma camada porosa de óxido antes da selagem (ROBERT, 2002).

A anodização do alumínio pode ser realizada com uma grande variedade de eletrólitos, empregando-se varias condições de operações, incluindo concentração e composição do eletrólito, presença de algum aditivo, temperatura, tensão e corrente (STEVENSON, 1994).

Algumas razões para anodização são (STEVENSON, 1994):

- Aumento da resistência à corrosão;
- Melhora na aparência decorativa;
- Aumento da resistência á abrasão;
- Aumento da adesão à pintura;
- Produção de cores decorativas;
- Permite à subsequente eletroposição;
- Isolante elétrico.

As duas principais soluções eletrolíticas são (STEVENSON, 1994):

- Solução crômica, com o ácido crômico como agente ativo;
- Solução com sulfúrico, com o ácido sulfúrico como o agente ativo.

A espessura média que se obtém na anodização, com exceção da anodização dura está no intervalo de 5 a 18  $\mu\text{m}$  (STEVENSON, 1994).

As principais diferenças entre os processos de anodização dura e o que utiliza o ácido sulfúrico são a temperatura e a densidade de corrente. Na anodização dura a temperatura varia de 0° a 10°C, e a densidade de corrente entre 2 a 3,6 A /  $\text{dm}^2$ . Os revestimentos obtidos com o processo de anodização dura são considerados mais espessos para um mesmo tempo de duração da anodização.

#### **A - Processo de Selagem (Fechamento dos Poros):**

A selagem de um revestimento anódico é um processo no qual a absorção, reação química ou outro mecanismo aumenta a resistência a corrosão de um filme anódico, melhora a durabilidade das cores produzidas na anodização colorida, ou concede outras propriedades desejadas (COTELL, 1994).

O processo de selagem também é conhecido como fechamento dos poros, Este processo é feito normalmente da reação da camada oxidada com água quente, sendo que algumas vezes misturada com acetato de níquel. O óxido na superfície e dentro dos poros reage para formar um óxido hidratado (boehmita), que tem uma estrutura diferente e uma densidade mais baixa do que

o óxido anódico (tipo gama). Por causa da densidade mais baixa, o óxido hidratado ocupa um volume maior do que o óxido anódico do qual se forma. O produto desta reação preenche os poros e deixa a camada anodizada impermeável e estável diante de condições ambientais diversas (ROBERT, 2002).

A resistência a corrosão do alumínio anodizado depende da eficiência da operação de selagem. A selagem será eficiente se o revestimento anódico for contínuo, plano, aderente e de aparência uniforme (STEVENSON, 1994).

Esta operação de selagem é mantida pelo controle de pH e temperatura. Descarta-se a solução quando se formam sedimentos em excesso no tanque ou quando a superfície do material contaminada com material estranho. A selagem pode ser aplicada quando tem-se interesse em aumentar a resistência elétrica do material. Contudo a selagem pode reduzir a resistência a abrasão em 30% (STEVENSON, 1994).

## **B - Anodização em Ligas de Alumínio**

Em determinadas aplicações, o alumínio anodizado pode ser obtido mantendo-se a temperatura baixa de corrente elevada. Entretanto, se a liga a ser anodizada contiver altos teores de Cu e Si, algumas características especiais do filme de óxido não podem ser obtidas quando são utilizadas fontes de energia comuns de corrente contínua (NARASISMAHAN, 1989).

## **C - Influência dos Elementos de Liga na Anodização**

A anodização processada a 0°C durante 50 minutos nos substratos de Al, Al – Si 10 e Al-Si 10 – Cu com densidade de corrente variando de 3.0, 4.2 e 6.0  $\text{Adm}^{-2}$ . As imagens da secção transversal do filme de óxido feitas por microscopia ótica e de varredura mostram que a camada cresce de acordo com a densidade de corrente e tempo levado em consideração o substrato anodizado. A presença das partículas de Si na liga binária Al-Si10 e na liga ternária Al-Si 10 – Cu gerou uma formação de uma camada não uniforme, sendo a presença de falhas associadas com a oxidação parcial das fases secundárias e uma saliência na interface substrato / óxido (FRATILA, 2002).

Após o início do crescimento do filme, a densidade de corrente abaixa pelo fato do filme tornar-se um isolante. Quando a intensidade de campo elétrico em torno do filme diminui, as espécies do eletrólito entram em contato com a fase externa do filme. Este processo afina a camada anódica em regiões específicas, gerando o aumento do campo elétrico ao redor do filme. Nestas regiões de alto campo elétrico em conjunção com a geometria local acarreta na dissolução do filme de óxido (PAKES, 2003)

#### **D - Efeitos das Partículas do Si no Processo de Anodização**

No processo de crescimento de filme anódico em uma liga Al-Si encontra-se a entrada de partículas de Si na camada de óxido, concomitante à formação de uma camada de óxido não uniforme mostrado na Figura 2.11 (FRATILA, 2002).

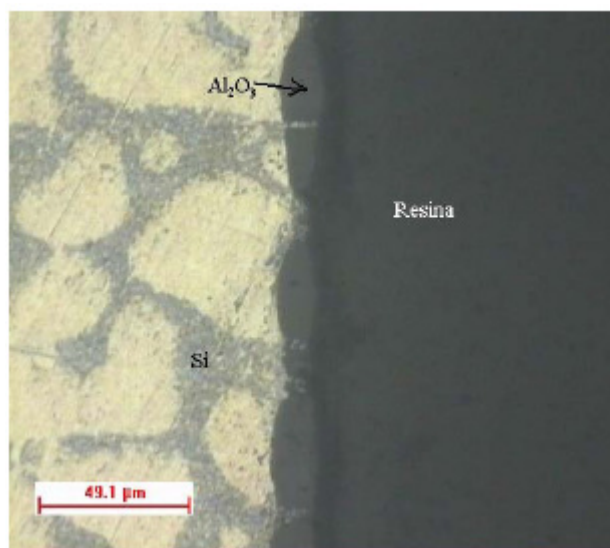


Figura 2.11 – Micrografia ótica da secção transversal da liga Al-Si (REGONI, 2004).

Pela observação do filme em corte transversal no microscópio ótico constatou-se que as partículas de Si presentes na liga causavam descontinuidades na camada anódica.

## **E - Processo de Anodização Dura:**

A anodização dura é geralmente feita em banho de ácido sulfúrico (cerca de 10%) em baixas temperaturas (tipicamente 3°C). Isto produz um revestimento com células largas e poros de pequeno diâmetro. Este revestimento é extremamente duro e resistente. A duração do banho deve ser de, no mínimo, duas horas, sendo quatro horas o tempo ótimo. A anodização dura geralmente tem um tom escuro, acinzentado (ROBERT, 2002).

O emprego das ligas de alumínio é restrito, devido à sua baixa dureza e à sua insatisfatória resistência ao desgaste. Em relação ao substrato, os filmes anodizados duros são mais espessos, aderentes, mais resistentes à corrosão, e a abrasão e apresentam a dureza mais elevada. A anodização dura é geralmente utilizada no tratamento das ligas de alumínio que contém menos que 5% de cobre e menos que 7% de silício (STEVENSON, 1994)

As ligas de alumínio podem, através da anodização dura, atingir espessuras entre 50 e 700 µm a partir de uma ampla variedade de eletrólitos, desde que, os efeitos das variáveis do processo sejam cuidadosamente selecionados e controlados (STEVENSON, 1994), (NARASISMAHAN, 1989).

### **2.4 - Processo de Pintura KTL**

A eletroforese foi desenvolvida como método de pintura para atender aos requisitos anticorrosivos, dureza superficial e melhor acabamento para peças fundidas exigido pela indústria automobilística, de autopeças e de eletrodomésticos. A eletroforese é conhecida por vários nomes, conforme seguem: *elpo*, *e-coat*, *electrodip*, *electropaint*, *paint plating*, *eletrodeposição*, *pintura eletroforética*, *AED*, *CED*, *HFBECE*, *LFBECE*, *KTL* e *DKTL* (DEELP, 2007).

Basicamente, a eletroforese ocorre quando se mergulha um objeto metálico em um banho de tinta diluída em água, através da qual se faz passar uma corrente elétrica, onde a peça, conectada a um pólo sendo o outro o próprio tanque, ou então, eletrodos colocados em suas paredes laterais (DEELP, 2007).

Pela teoria eletroquímica, quatro fenômenos ocorrem durante este processo de pintura:

#### **Eletrólise:**

É o fenômeno da reação de óxido-redução com separação de íons, isto é hidrogênio e oxigênio, em solução, sob a influência da aplicação de uma diferença de potencial (DEELP, 2007).

#### **Eletroforese:**

É o fenômeno de migração da partícula de pigmento, envolvida pela respectiva resina e demais componentes da tinta, em direção a peça a ser pintada, quando a mesma é submetida a uma diferença de voltagem elétrica (DEELP, 2007).

#### **Eletrocoagulação:**

Basicamente, o que ocorre neste fenômeno é a aproximação do macroíon ao pólo contrário a sua carga, onde há uma troca de carga elétrica, provocando a adesão da partícula ao substrato, formando assim um filme de tinta insolúvel em meio aquoso (DEELP, 2007).

#### **Eletroosmose:**

É o fenômeno de eliminação dos eletrólitos contidos no veículo da tinta aplicado, ou seja, o material eletrodepositado perde quase toda a água, tornando-se hidrófobo. As Figuras 2.12.1 e 2.12.2 mostram os processos descritos:

A preparação do banho consiste em se diluir a resina e a pasta pigmentada a um determinado teor de sólidos variando de 18 a 22%. Alguns solventes coalescentes são adicionados esporadicamente ao banho, os quais são adicionados para manter uma boa dispersão dos constituintes do banho e também da eletropintura. O teor destes materiais varia entre 2 a 4%. O tempo de eletropintura varia de 2 a 4 minutos. No fim desse tempo de eletrodeposição, a peça é retirada do tanque, sendo que a mesma carrega consigo uma parte da tinta aderida mecanicamente. Esta tinta deve ser removida por um processo de lavagem que não afetará o filme eletro depositado, pois este é totalmente insolúvel neste estágio e aderente ao substrato conforme mostra a Figura 2.13. Após este estágio de lavagem a peça é curada em estufa de ar circulante com temperaturas entre 160 a 190 graus, por períodos de 15 a 25 minutos. Cabe frisar que este processo assegura que toda a superfície da peça seja “coberta”, por um filme de tinta podendo-se controlar com precisão a espessura da camada tanto nos contornos como também em

cavidades que possam existir no objeto a pintar. Os pigmentos e cargas são selecionados para se obter as características eletroquímicas e de resistência anticorrosiva, necessárias ao produto (DEELP, 2007).

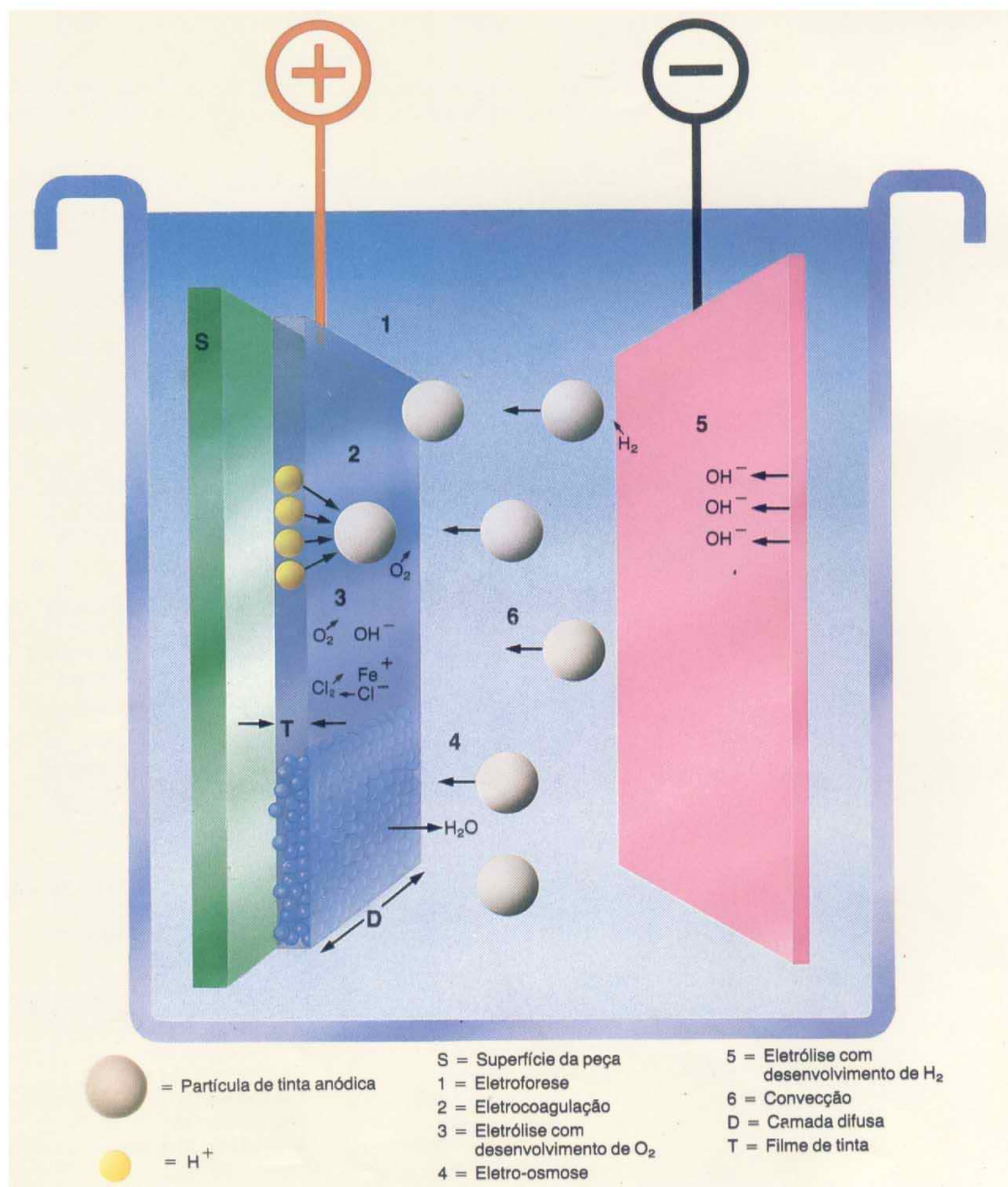


Figura 2.12.1 – Processo de pintura anódica (DEELP, 2007).

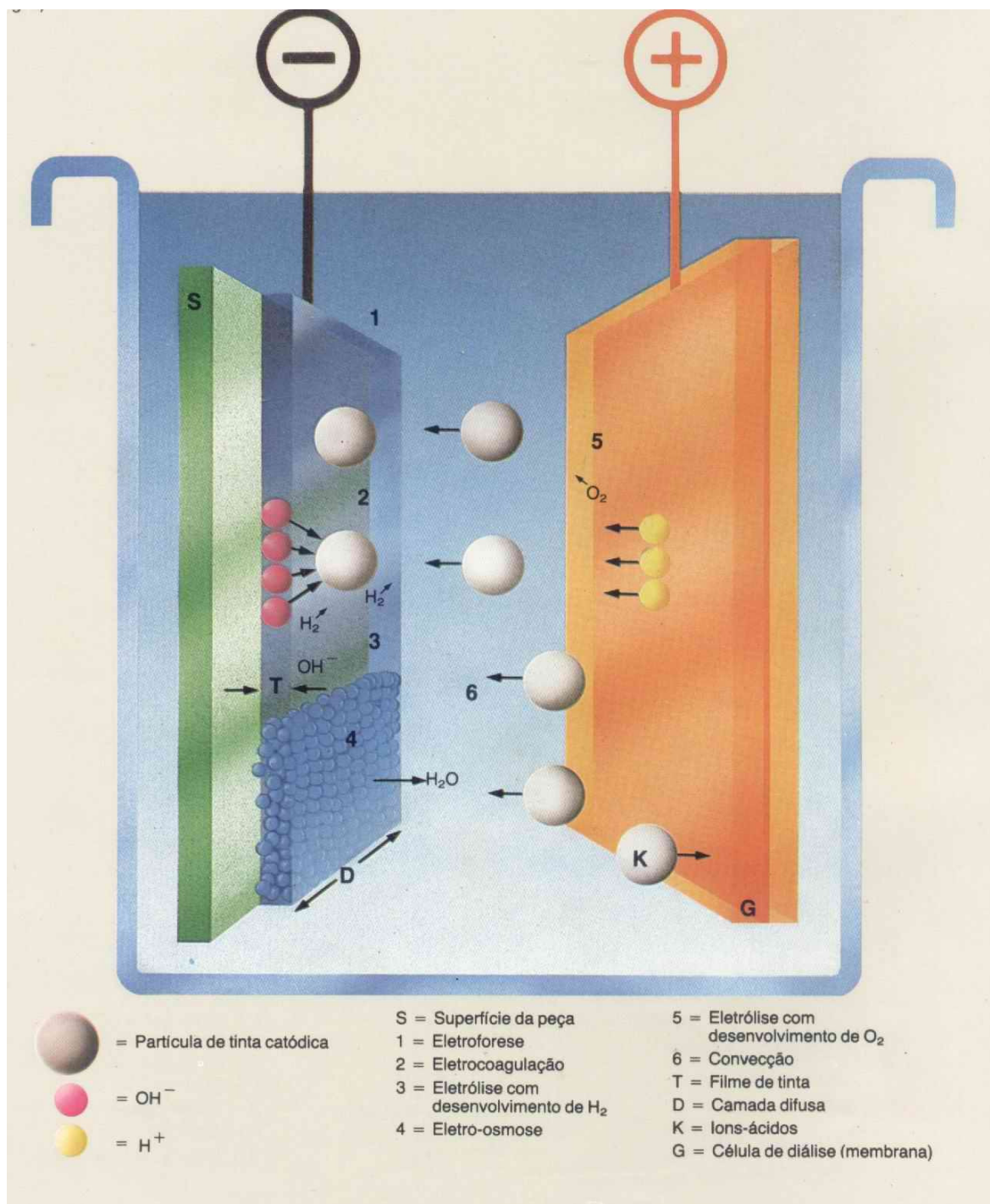


Figura 2.12.2 – Processo de pintura catódica (DEELP, 2007).

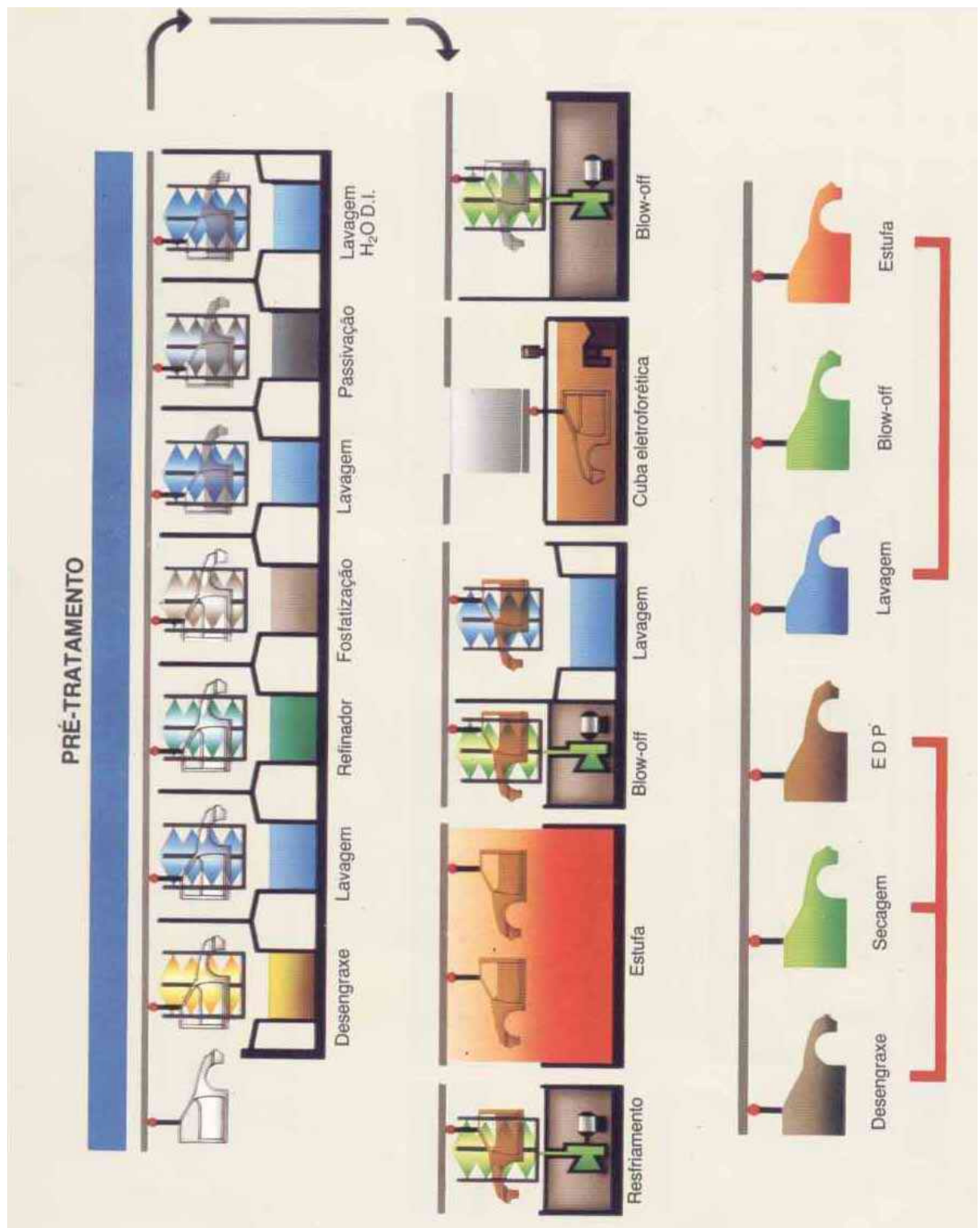


Figura 2.13 – Processo de eletrodeposição catódica (DEELP, 2007).

**Vantagens:**

- Automação é possível através da imersão da peça no banho, pode-se pintar toda sua área.
- Uniformidade do filme:
- A pintura por eletrodeposição produz uma camada extremamente uniforme em toda a superfície do substrato.
- Economia da tinta:
- Com o uso de equipamentos de ultrafiltração e sistema fechado de lavagem após a eletropintura, pode-se conseguir um aproveitamento de praticamente 100% da tinta.
- Não inflamabilidade:
- As tintas de eletrodeposição estão em meio aquoso, evitando-se assim perigos de incêndio.
- Os banhos de eletrodeposição produzem efluentes de fácil tratamento. Isto é devido ao mínimo teor de voláteis orgânicos, que não provocam danos ao meio ambiente quando utilizados corretamente.

**Desvantagens:**

- Instalação do sistema eletroforético exige um razoável investimento inicial por necessitar de equipamentos especiais.
- Controle de qualidade: apesar de relativamente simples, este sistema exige um controle diário dos parâmetros químicos e de processo de todas as etapas de pintura.
- Gama de cores: no momento, para os sistemas de alta performance química, pode se conseguir diversas tonalidades, fora o branco. No entanto, existem alguns sistemas, principalmente anódico, formulados para a cor branca brilhante, para artigos onde o aspecto visual seja mais importante que a proteção anticorrosiva.

**A - Cataforese de Alta Espessura**

A pintura por eletrodeposição catódica de alta espessura é aquela que apresenta um filme de tinta seca na ordem de 30 microns, enquanto que o primer de eletrodeposição catiônica convencional apresenta espessura média em torno de 17 microns. Esta variação na tecnologia tem

como objetivo melhorar a qualidade das carrocerias dos veículos automotivos, bem como a de seus componentes (DEELP, 2007).

Nos dias de hoje, todos estão convencidos de que o primer catiônico trouxe um grande avanço à performance anticorrosiva dos objetos metálicos pintados, além de tornar-se de alta confiabilidade, reprodutibilidade e estabilidade quando comparado com outros sistemas de pintura. Apesar do sucesso com este material, as pesquisas não pararam, sendo que estes desenvolvimentos foram dirigidos no sentido de maior estabilidade e lisura com espessuras na ordem de 30 microns. Conseqüentemente, obter-se-ia base para o acabamento final igual ao conjunto inicial composto de cataforese mais *primer surfacer* (DEELP, 2007).

A utilização da cataforese alta espessura é para pintura de caminhões e utilitários, onde pode substituir o conjunto composto de cataforese convencional mais primer surfacer. Com isto, obtêm-se um aumento de qualidade e uma redução nos custos de pintura desses veículos. Sua utilização em carrocerias de automóveis é também vantajosa, resultando na redução da espessura do primer surfacer, ou seja, substituindo-se por um material mais nobre e de fácil controle de aplicação como é a cataforese. Na indústria de autopeças, a utilização do mesmo é recomendada, principalmente onde se exige espessuras maiores que da cataforese de baixa espessura, ou ainda em peças onde o primer funciona também como acabamento (DEELP, 2007).

### **Vantagens:**

- Melhor proteção contra a corrosão de bordas, devido o aumento da uniformidade e espessura do filme aplicado nessas áreas.
- Melhor cobertura e nivelamento do filme, com menor incidência de lixamento e retrabalho das unidades.
- Melhor poder de penetração, com melhor proteção anticorrosiva nas áreas internas.
- Melhor resistência à ação de pedriscos, inclusive com melhor elasticidade do filme aplicado.

Outras vantagens observadas quando comparado com o CED convencional:

- Melhor resistência à corrosão galvânica e proteção corrosiva de bordas.
- Melhor proteção anticorrosiva em partes onde não se assegura a total remoção dos óleos e graxas.
- Melhor ancoragem do acabamento sobre o mesmo.

- Menor tendência à sedimentação dos pigmentos contidos no banho, e conseqüentemente menos sujidade horizontal nos veículos.

**Desvantagens:**

- Custo elevado para implantar o processo de cataforese alta espessura.
- Menor flexibilidade no processo, pois havendo alguma falha de aplicação, não se pode utilizar os recursos do primer surfacer na correção do problema.
- A aplicação dos sealers implica na manutenção da estufa do *primer* para a cura dos mesmos.
- Limitação na cor, sendo, no momento, possíveis em diversas tonalidades, fora o branco.

## **2.5 - Medidas de Dureza**

Para quantificar a dureza foi utilizada a medida de dureza Vickers. O cálculo da dureza tem por base a determinação da área de impressão por uma ponta de diamante. Aplicando-se uma carga fica impresso um quadrado na seção do filem. As duas diagonais desse quadrado são medidas e através da Equação 2.1 calcula-se a dureza Vickers (HERRON, 1985).

$$HV = \frac{2 * P * \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = 1,854 * \frac{P}{d^2} \quad \text{Equação 2.1}$$

Sendo:

- P = Carga do ensaio (kgf.)
- D = Média das diagonais do quadrado impresso (mm)
- $\theta = 136^\circ$  (ângulo entre as faces opostas de diamante)

## **2.6 - Confiabilidade**

Antes de apresentar a taxa de falha da tubulação de água vale ressaltar que a confiabilidade é a probabilidade de um sistema ou um produto de executar a sua função de maneira satisfatória, dentro de um intervalo de tempo e operando em determinadas condições. (SCAPIN, 1999).

A confiabilidade de um componente ou sistema é igual à probabilidade de que o componente ou sistema não falhe durante um determinado intervalo de tempo, ou modo equivalente, confiabilidade é igual a probabilidade de que o componente ou sistema ainda esteja em operação no tempo  $t$ . Por exemplo, para um determinado sistema,  $R=0,90$  significa que 90% de seus componentes, utilizados sob dadas condições, estarão ainda em funcionamento no instante ( $t_1$ ), ou ainda, determina-se a vida B10, ou seja 10% dos componentes já falharam no instante ( $t_1$ ).

### **A - Classificação de Falhas**

Para se obter uma boa estimativa da confiabilidade, as falhas devem ser detalhadas. O estudo de falhas é muito subjetivo, ou seja, o que para algumas pessoas são falhas, para outras não são. Fazendo uma analogia entre fabricantes e consumidores, o que para os fabricantes não são falhas e sim desgaste e ou manutenção preventiva de produto com custos direcionados aos usuários, podem ser consideradas falhas por estes, ou seja, ocorre uma diversidade entre usuário e fabricante em relação ao que é exatamente desempenho degradado ou uma falha. (BLASHE, 1994).

As falhas são defeito que afetam a função de desempenho de um determinado produto, enquanto que os defeitos não afetam a função de desempenho. (BLASHE, 1994).

O processo de classificação de falha é mostrado na Figura 2.14.

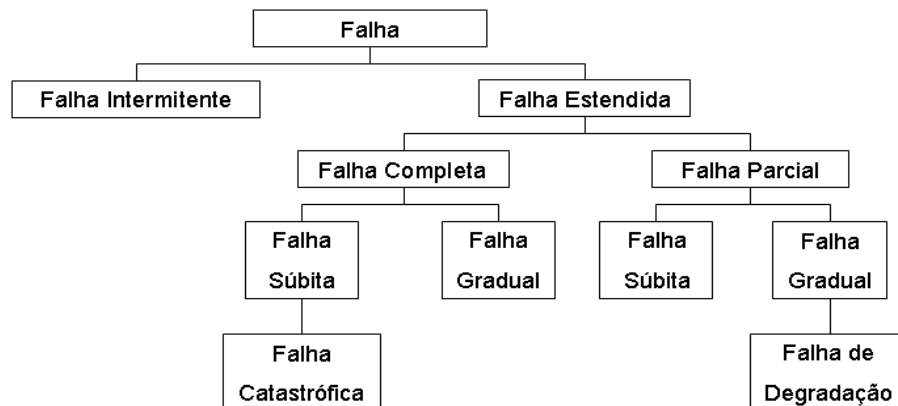


Figura 2.14 – Classificação das falhas (BLASHE 1994).

Os tipos de falhas podem ser definidos como:

- **Falha Intermitente:** Esta falha resulta em falta de alguma função do produto, apenas por um curto período de tempo. O componente retorna ao seu estado funcional imediatamente após a falha;

- **Falha Estendida:** Esta falha resulta em falta de algumas funções, e que continuarão até que as partes falhadas sejam substituídas ou reparadas. Este tipo de falhas pode se dividir em 2 tipos:

**Falha Completa:** Esta falha causa uma falta completa de uma função exigida;

**Falha Parcial:** Esta falha conduz a falta de algumas funções.

Estas falhas podem ser de natureza:

**Falha Súbita:** Esta falha não pode ser evitada ou prevenida através de testes e inspeção;

**Falha Gradual:** Esta falha pode ser evitada ou prevista através de teste e inspeção.

As Falhas ainda podem ser combinadas para dar a seguinte classificação:

**Falha Catastrófica:** Esta falha é resultado da combinação da Falha Súbita e Falha Completa;

**Falha de Degradação:** Esta falha é resultado da combinação da Falha Parcial e Falha Gradual.

Temos ainda outros tipos de falhas relacionados com o ambiente e modo de operação (BLASHE, 1994):

**Falhas de Desgaste:** Esta falha é atribuída ao processo normal de desgaste de um componente ou sistema;

**Falhas de Mau Uso:** Esta falha é atribuída a aplicação de estresse, além das condições de uso para que o componente ou sistema tenha sido projetado;

**Falhas Inerentes a Fragilidade:** Esta falha acontece devido a erros de projeto, produção ou montagem, que fazem com que o item falhe quando sujeito a estresse dentro das capacidades específicas.

Outras duas propostas de tipo de classificação de falha (Norma MIL-STD-781):

**Falha não Relevante:** Esta falha é causada por uma condição externa que não é um requisito de produto e que não é esperado em campo durante o uso do componente o sistema.

**Falha Relevante:** Esta falha é um requisito de produto, poderia razoavelmente falhar em campo.

## **B - Função Taxa de Falhas**

A função taxa de falha  $\lambda(t)$  em diferentes situações e períodos de tempo, fornece informações sobre o ciclo de vida, assemelhando-se ao perfil de uma banheira, caracterizada por três regiões específicas mostrados nas Figuras 2.15 e 2.16.

**Região I:** Correspondem as falhas precoces, que surgem durante a instalação: montagem, falhas de material, componentes fora do especificado ou mesmo falha no conceito do projeto, são alguns exemplos que podem causar altas taxas de falha no início de vida do componente. Premissas como controle total da qualidade na produção, utilização de ferramentas da qualidade, como FTA e FMEA, qualidade de processo de fabricação entre outras ações, proporcionam uma redução na viabilidade, tornando o processo e o produto mais robusto, reduzindo assim, possíveis falhas nesta região da curva da banheira.

**Região II:** Corresponde ao tempo de vida útil do componente ou sistema. Durante este período, as falhas são aleatórias e a taxa de falhas é constante, correspondendo a uma função exponencialmente decrescente.

As falhas aleatórias normalmente se originam de carregamentos inevitáveis e inesperados e menos comumente devido a defeitos inerentes ao equipamento em si (SOUZA, 2002).

**Região III:** Corresponde à fase de desgaste ou fadiga, durante a qual a taxa de falhas aumenta rapidamente com o passar do tempo.

O setor automobilístico tende a trabalhar com um índice levado de confiabilidade para os componentes que comprometam o funcionamento do motor, realizando testes severos e com análise de peças durante o processo de desenvolvimento, eliminando desta forma a Região I de falhas de início de funcionamento. É interessante substituir o componente após  $(t_1-t_2)$ , mesmo que não tenham falhado.

A predição da confiabilidade é desejável em qualquer desenvolvimento de componente, pois está ligada ao conhecimento das causas dos diversos modos de falhas, assim como as respectivas ações corretivas (CONNOR, 1991).

No caso de equipamentos eletrônicos apresentarem um período de vida útil muito longo, com elevados valores de intervalo  $(t_1-t_2)$  conforme mostrado na Figura 2.11 (RAMAKUMAR, 1993).

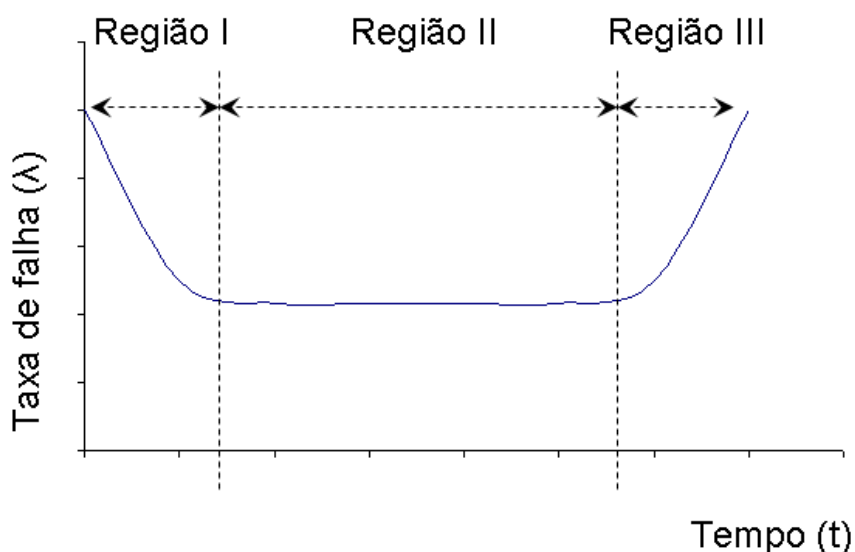


Figura 2.15 – Curva da banheira para componentes eletrônicos (RAMAKUMA, 1993)

No caso de componentes mecânicos a região III de desgaste tende a predominar, devido aos fenômenos de desgaste, fadiga, corrosão e outros efeitos que colocam o equipamento em processo de degradação conforme mostrado na Figura 2.12.

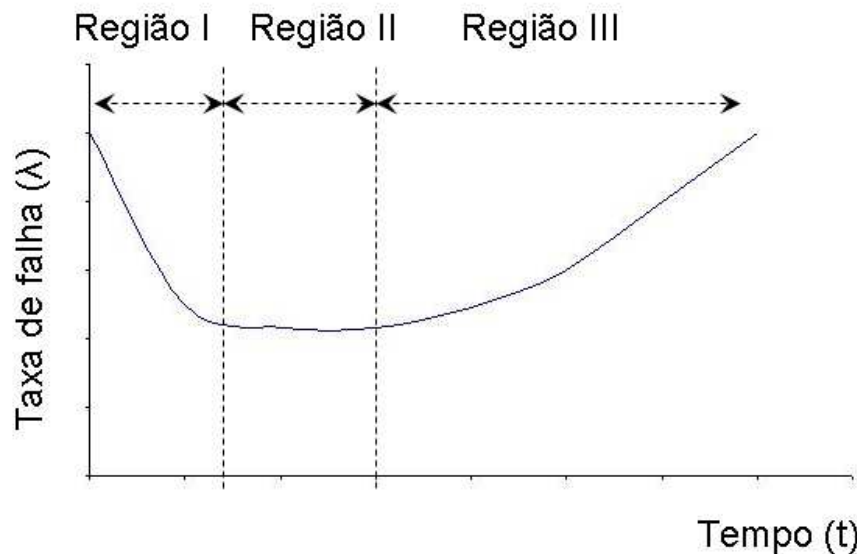


Figura 2.16 – Curva da banheira para componentes mecânicos (RAMAKUMAR, 1993).

### C - Método PDCA:

O método PDCA é constituído de 4 etapas:

#### PLAN (Planejamento)

No planejamento é definida a meta de interesse e estabelecido os meios (planos de ação), necessários para se atingir a meta proposta. Esta etapa é constituída das seguintes fases:

##### Identificação do problema:

Nesta fase procura-se definir claramente o problema e reconhecer a importância para a sua solução.

##### Análise do fenómeno:

Nesta fase procura-se conhecer profundamente o problema e definir os focos do problema a serem tratados nas estratificações feitas (diagrama de causa e efeito).

##### Análise do processo:

Nesta fase é feita a utilização dos FMEA para descobrir, visualizar e priorizar as causas do problema a ser tratado.

##### Estabelecimento de um plano de ação:

Nesta fase é recomendado um plano de ação caso a falha já seja detectada.

**DO (Execução):**

Na execução são implementados os planos de ação, determinados na fase de planejamento, os planos são implementados e são coletados os dados que possam fornecer as informações sobre a causa raiz do problema

**CHECK (Verificação):**

Na verificação é feita uma análise dos dados coletados na etapa de execução, é feita uma avaliação dos resultados obtidos em relação à causa raiz.

**ACTION (Ação):**

Na ação a ser tomada depende dos resultados obtidos e avaliados na etapa de verificação:

Se a causa raiz foi eliminada, são estabelecidos os meios de manutenção dos bons resultados obtidos;

Se a causa raiz não foi alcançada, inicia-se um novo giro de PDCA com o objetivo de se encontrarem meios que levem o processo a obter resultados que elimine a causa raiz do problema.

Esta metodologia pode assumir características diferentes para solução problema, ou seja, teremos problema que não será necessário ter todas as etapas concluídas para a sua total implementação.

**D - Análise do Modo de Falhas (FMEA):**

A metodologia de análise de modo de falha potencial é uma ferramenta que visa, a princípio evitar, por meio da análise das falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no projeto do produto ou do processo. Este é objetivo básico dessa técnica, ou seja, detectar falhas antes que se produza uma peça ou produto. Pode-se dizer que, com a sua utilização, reduzem-se as chances do produto. Com sua utilização, reduzem-se as chances do produto ou processo falhar, ou seja, busca-se aumentar sua confiabilidade (HORITA, 2002).

A análise FMEA inicia-se com a listagem dos componentes do produto e suas respectivas funções em uma tabela. Em seguida, para cada função, são indicados possíveis modo de falha e

feito e causa. Com essa análise crítica, é possível adotar medidas, ainda na fase de projeto, criando métodos para controle dos componentes e suas funções no processo produtivo, com a finalidade de eliminar os possíveis modos de falha.

Contudo, a análise do FMEA é um processo contínuo que, mesmo durante o ciclo de produção o produto, deve ser constantemente revisado, adicionando informações de campo, ou até pela própria mudança de algum item do produto, para avaliação do grau de criticidade, pois no FMEA são calculados índices para priorizar a importância de um determinado item. Tais índices são baseados na ocorrência (probabilidade de ocorrência de uma causa de falha), gravidade (grau de gravidade do efeito da falha), detecção (probabilidade da falha ser detectada antes de chegar ao usuário) os quais geram Índice de Risco, que pode ser usado para priorização e tomada de decisões, sendo que este nada mais é que o produto dos outros três indicadores.

Análise do Tipo de FMEA (STAMATIS, 1995):

**FMEA de Sistema:** Usado para analisar sistemas e subsistemas no estágio de projeto. Uma análise de FMEA de sistema foca os modos de falhas potenciais entre as funções do sistema causadas por deficiências do próprio sistema.

**FMEA de Projeto:** Usado para analisar produtos antes de serem lançados para a manufatura. Uma análise de FMEA de projeto foca no modo de falhas potenciais causadas por falhas de projeto;

**FMEA de Processo:** Usado para analisar os processos de manufatura e montagem, analisando seus respectivos modos e efeitos e falhas potenciais;

**FMEA de Serviço:** Usados para analisar serviços antes de eles atingirem o consumidor, analisando falhas causadas por deficiência do sistema o projeto.

## **2.7 - Taxa de Falha da Tubulação de Água com o Tratamento Anodização Dura:**

Antes de iniciar-se o estudo da metodologia PDCA deve-se conhecer qual são os modo de falha que a tubulação de alumínio da saída de água de saída apresenta bem como a sua taxa de falha.

Os dados de campo são considerados censurados, ou seja, existem registros sobre os dados dos motores que falharam, porém não são registradas informações sobre os motores que

não falharam ao longo período de garantia, nem mesmo a quilometragem ao final deste período (GUNTER, 1994).

No que se refere à tubulação de água do motor buscou-se junto à área de assistência técnica a taxa de falha e foi encontrado um valor de R/1000 de 15, ou seja, a cada 1000 veículos vendidos 15 irão apresentar a falha de vazamento do líquido de arrefecimento do motor. As Figuras 2.17.1, 2.17.2, 2.17.3 e 2.17.4 mostram detalhes da tubulação de água com vista superior e inferior e de uma peça retornada de campo para análise.



Figura 2.17.1 – Tubulação de água lado cabeçote do motor



Figura 2.17.2 – Tubulação de água lado superior



Figura 2.17.3 – Tubulação de água lado veículo



Figura 2.17.4 – Tubulação de água lado inferior

Conforme os dados apresentados pelo sistema de garantia, estas tubulações de água foram trocas no período de garantia, cuja reclamação era que o líquido de arrefecimento estava vazando pela tubulação de água.

Em uma análise rápida, feita pelas concessionárias ficou constatado que as peças apresentam cavitação. Esta cavitação pode ser vistas nas Figuras 2.18.1 e 2.18.2, estas peças estavam instaladas em um motor de campo que apresentou superaquecimento

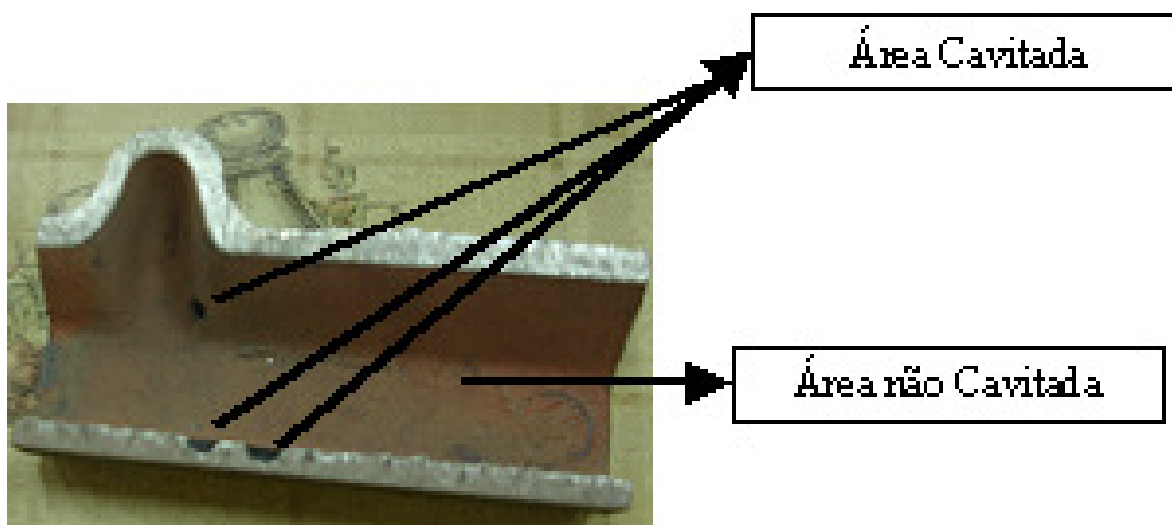


Figura 2.18.1 – Tubulação de água com falha de campo

Conforme mostrado nas Figuras 2.18.1 e 2.18.2 tem-se uma tubulação de água em corte para verificar a parte interna, os pontos escuros do material parecendo falha de fundição mas é a cavitação. Todas as peças analisadas encontrou-se o fenômeno de cavitação em diferentes regiões da parte interna da tubulação de água.

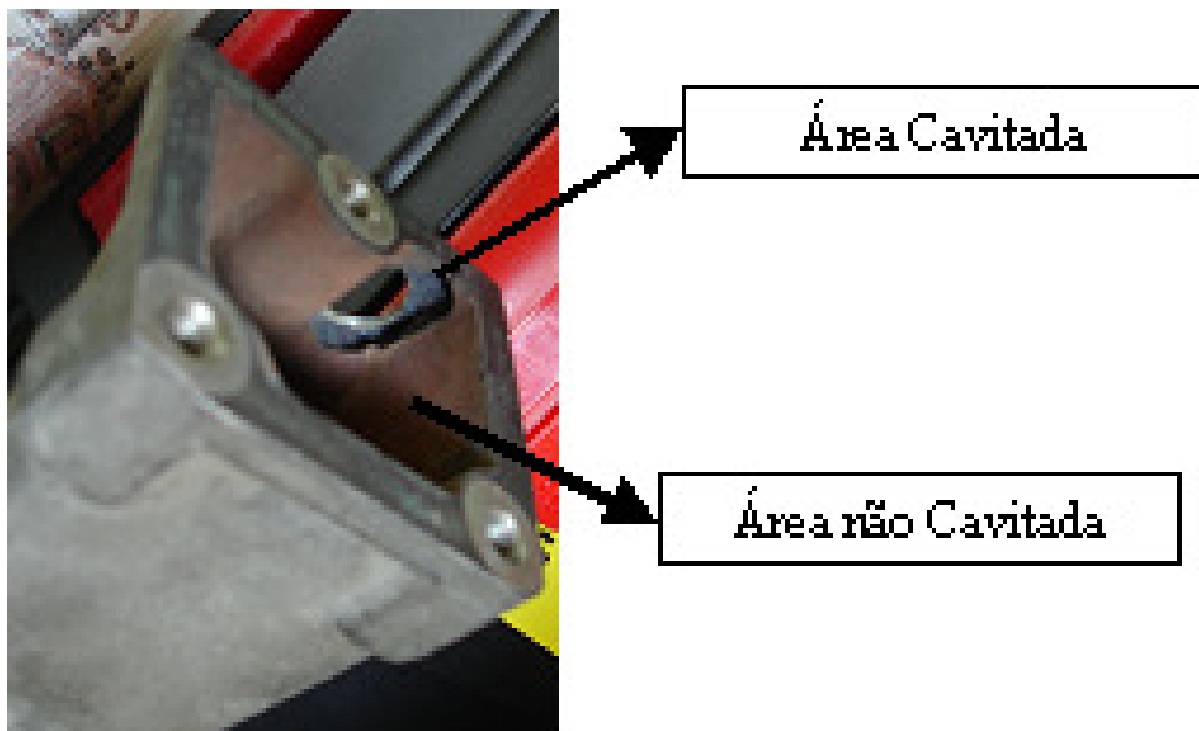


Figura 2.18.2 – Tubulação de água com falha de campo

## 2.8 - Cavitação

Cavitação é um fenômeno físico que ocorre no circuito de arrefecimento a velocidades que induzir fluxo turbulento e diferenças de pressão alta - Essas condições levam a implosão das bolhas de vapor. Quando ocorre a implosão de bolhas em uma superfície de metal, as ondas de pressão provocam danos ao material.

A cavitação pode ocorrer em qualquer componente de um motor de combustão interna, quando um fluxo de líquido de arrefecimento passe através dele. Este fenômeno pode ser explicado usando o um cilindro d motor diesel como exemplo. Danos de cavitação podem ocorrer no líquido de arrefecimento, como resultado de vibrações de alta frequência gerado pelas forças de gás da câmara de combustão, ele e os pulsos de choque do pistão, que se movem a partir do impulso às superfícies. Esta vibração e estes pulsos resultam em vibrações de alta frequência da parede do cilindro, que é transferido para o líquido de refrigeração, bolhas de vapor, que implode quando o aumento de pressão, novamente, é criado nos pontos em que a pressão é menor que a pressão de vapor do líquido de arrefecimento. Deste resultado é geradas forças em determinados

pontos, que podem conduzir à deterioração da camada superficial do cilindro ou de outro componente, ou seja, partículas microscópicas são destacadas, resultando em cavitação. A superfície do cilindro que teve a camada deteriorada pode apresentar vazamento de água.

Fatores que influenciam a cavitação nesta área são a rugosidade e a velocidade da variação de pressão na câmara de combustão, o movimento do pistão e a massa, o layout do eixo do pino do pistão, espessura da parede do material da galeria de água e layout de componentes.

### 3. MÉTODO DE TRABALHO

#### 3.1 - Perfil da Empresa

O método de trabalho escolhido para a avaliação da taxa de falha para a tubulação de água foi o PDCA. Buscou-se todo o histórico de desenvolvimento da tubulação de água e foi colocado em uma linha do tempo conforme mostrado na Figura 3.1. A MWM tem investido no desenvolvimento de seus produtos e processos um alto valor agregado que vão além de satisfazer as necessidades e exigências dos clientes. A linha de produto é extensa e se multiplica a cada ano. Observou-se que este componente foi desenvolvido inicialmente para um motor de 110cv e que agora se aplica até em motores de 235 cv de potência. Com isso buscou-se a taxa de falha no Departamento de Assistência Técnica e encontrou-se uma taxa de falha R/1000 de 15, ou seja, a cada 1000 veículos vendidos 15 irão apresentar a falha de vazamento do líquido de arrefecimento do motor.

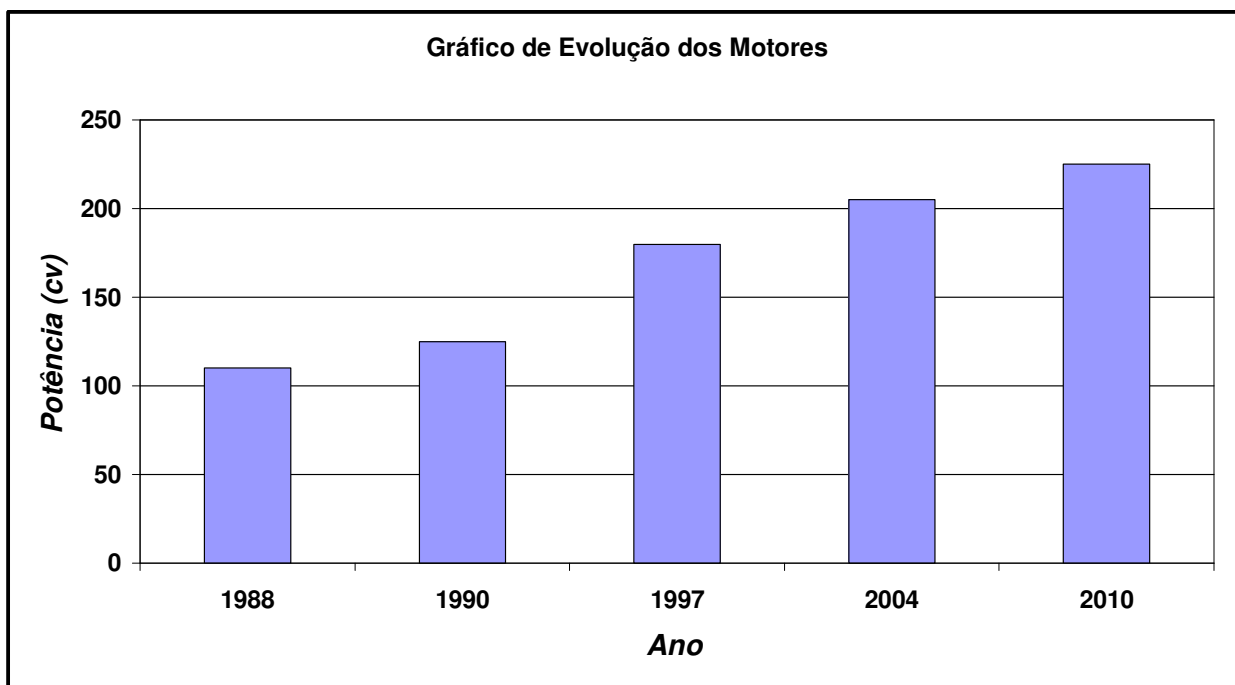


Figura 3.1 – Evolução dos motores (MWM, 2010).

Como os motores tiveram um incremento de potência, o seu sistema de arrefecimento teve que ser redimensionado, Instalou-se radiadores mais eficazes para cada tipo de aplicação. Estes motores são de aplicações veiculares (ônibus, tratores, caminhões e veículos fora de estrada), estacionários (geradores, irrigadores, compressores de ar) e marítimos.

Como um dos focos principais é reduzir o índice de falha da tubulação de água, foi estruturada uma tabela com os tipos de reclamação para identificar os modos de falha. Outros fatores observados foram as dificuldades em identificar os verdadeiros modos de falha, pois os clientes ainda não têm uma forma de análise de peças em garantia.

Tabela 3.1 – Tipo de reclamação

| <b>Reclamação</b>        | <b>Qt.</b> |
|--------------------------|------------|
| <b>Vazamento de água</b> | 115        |
| <b>Trinca</b>            | 40         |
| <b>Falta de usinagem</b> | 15         |
| <b>Total</b>             | 170        |
|                          |            |

Após intensa análise, foram identificados os modos de falha da tubulação de água conforme demonstra a Figura 3.2. O modo de falha de maior responsabilidade é o de vazamento de água. Conforme Tabela 3.1 fez se uma análise com 170 reclamações que se encontram no sistema de garantia da empresa, das quais 115 são de vazamento de água e verificou-se o seguinte resultado:

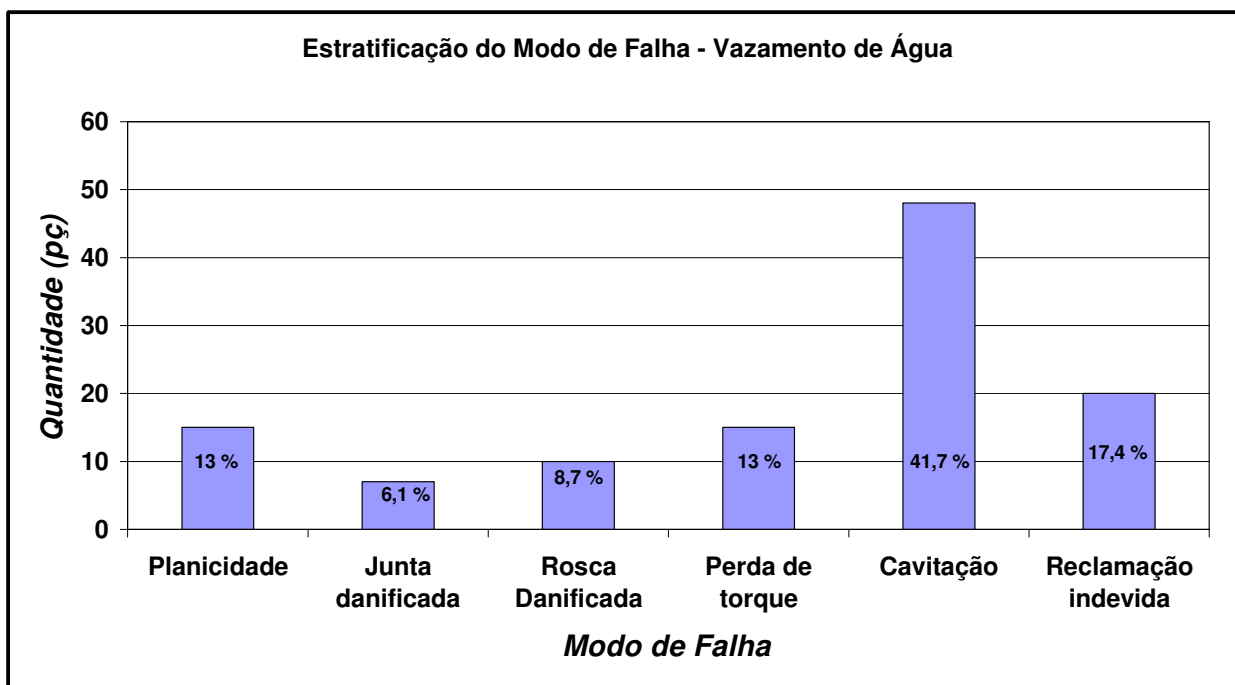


Figura 3.2 – Gráfico de estratificação do modo vazamento de água (MWM, 2010).

Como o Modo de Falha de Vazamento de Água foi o maior índice observado, estratificou-se por modos de falha e observou-se que o maior índice de falha é de cavitação. Buscou-se canalizar todo o estudo para este modo em específico, deixando os demais modos de falha para futuros estudos como proposta. O método proposto de análise conforme mostrado na Figura 3.3 foi desenvolvido com o objetivo de minimizar os impactos inerentes a modificação do produto, conforme já comentado na introdução deste trabalho, fruto de experiências vivenciadas pelo departamento de Engenharia do Produto da MWM, responsável pela modificação de produto. Tendo como base à metodologia PDCA, com foco na intensificação do planejamento das atividades, não sendo esta ferramenta como objeto de análise neste trabalho

**Fase 1** - Compreende planejar e identificar a causa raiz, etapa considerada como vital para o sucesso da solução do modo de falha identificado.

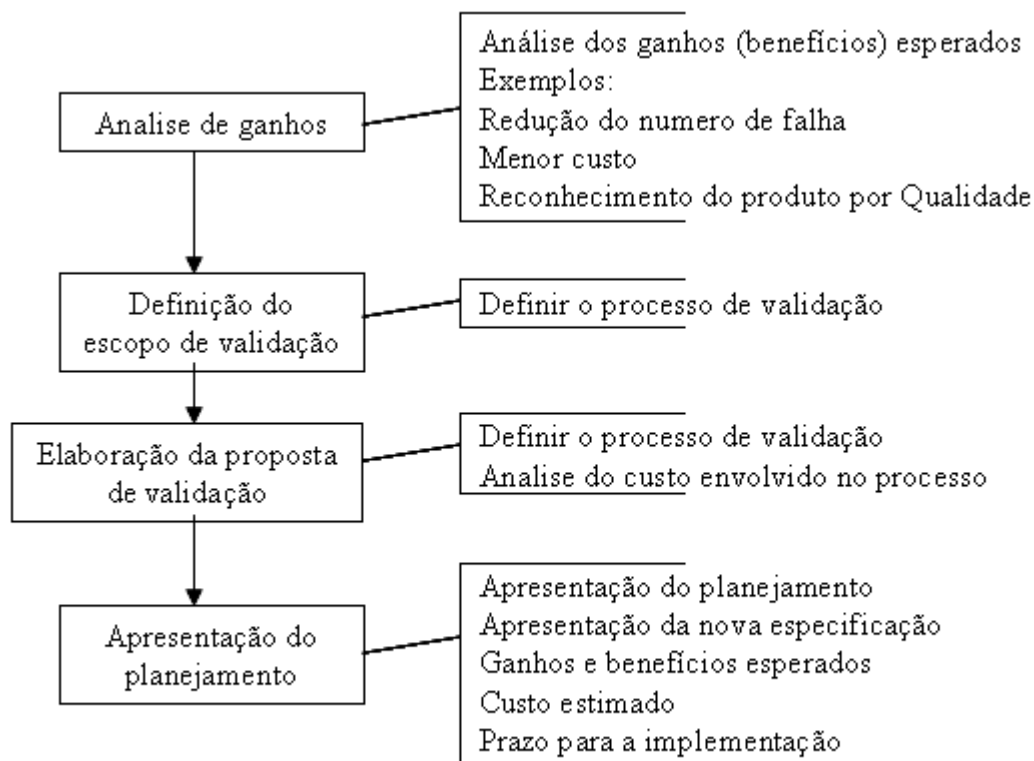


Figura 3.3.1 – Detalhamento do PDCA – Parte 1

### 3.2 - Composição Química

A liga Al-Si-10 Mg (a) T6 (segundo a norma EM 1706, European Standard, 1997) foi obtida da Wetzel Divisão de Alumínio localizada em Santa Catarina. Esta liga foi fundida no formado de uma peça tubulação de água.

Na liga de alumínio foi realizada uma análise por Fluorescência de Raio-X.

### **3.3 - Caracterização das Amostras**

As etapas de caracterização das amostras são descritas a seguir:

- Microscopia Ótica
- Microscópio Eletrônico de Varredura
- Fluorescência de Raios-X
- Dureza

As imagens das microestruturas foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura, com as quais se pode avaliar a diferença entre a camada anodizada dura e a pintura KTL quanto ao quesito uniformidade da espessura para cada proteção superficial.

A medida de dureza foi realizada para verificar qual é influência de cada proteção superficial aplicada na tubulação de água.

### **3.4 - Caracterização por Microscópio Ótico**

As amostras selecionadas foram retiradas de uma peça que tem o tratamento anodização dura que apresentou a cavitação e de uma peça nova, ou seja, sem uso.

As amostras foram embutidas com resina de poliéster de cura a frio, depois foram lixadas em lixa d água nos grãos 220, 320, 400, 600, 1200, e 1500 e polidas em panos de polímeros Buehler G-Cloth com alumina no grão 1,0µm para o polimento.

Após o lixamento e polimento, as amostras foram colocadas no Microscópio Ótico Leica M ILM do Departamento de Engenharia de Fabricação (DEF) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. O objetivo da microscopia óptica foi determinar diferenças estruturais de uma amostra que apresentou cavitação com outra amostra que não apresentou a cavitação de uma mesma peça e comparando com uma peça nova.

### **3.5 - Fluorescência de Raios – X**

As amostras selecionadas foram retiradas de uma peça que tem o tratamento anodização dura que apresentou a cavitação e de uma peça nova, ou seja, sem uso.

As amostras foram cortadas na seção transversal em tamanho de 25 x 25 mm, depois foram lixadas na seção transversal em lixa d'água nos grãos 220, 320, 400. Após o lixamento, as amostras foram colocadas no espectrômetro de fluorescência de raios-X, marca Rigaku de modelo RIX-3200.

**Fase 2** - Compreende a aplicação efetiva do planejamento previsto com ênfase na definição. O ponto crucial a ser considerado nesta fase se refere à execução do teste de validação.

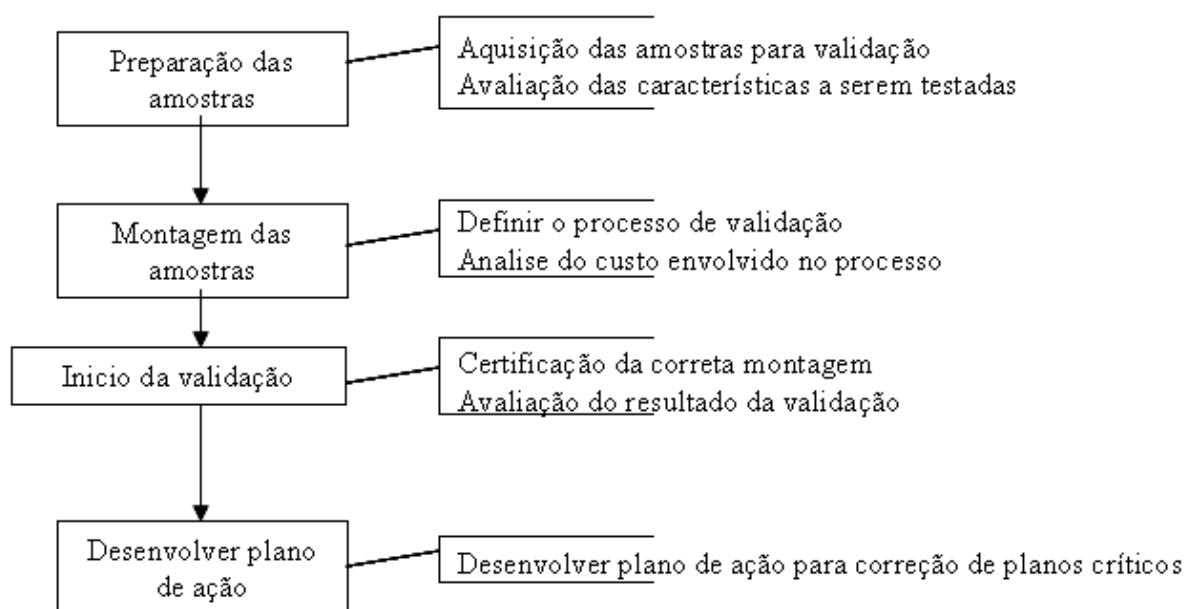


Figura 3.3.2 – Detalhamento do PDCA – Parte 2

**Fase 3** - Compreende a validação das fases 1 e 2 através da verificação preliminar de um microscópio eletrônico. Para a aplicação desta fase é necessário que haja evidências da nova proteção aplicada à tubulação de água. O resultado desta etapa é determinante para a fase consecutiva.

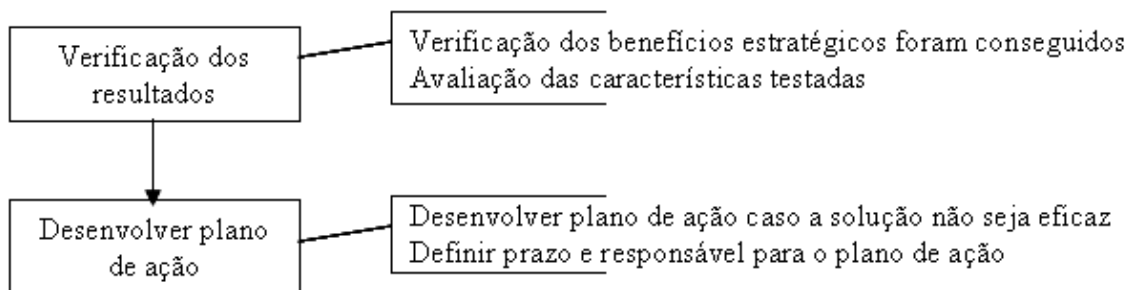


Figura 3.3.3 – Detalhamento do PDCA – Parte 3

### 3.6 - Caracterização por Microscópio Eletrônico de Varredura

As amostras selecionadas foram retiradas de uma peça que tem o tratamento anodização Dura e de uma peça com Pintura KTL.

As amostras foram embutidas de maneira ficar com a seção transversal com resina de poliéster de cura a frio, depois foram lixadas na seção transversal em lixa d água nos grãos 220, 320, 400, 600, 1200, e 1500 e polidas em panos de polímeros Buehler G-Cloth com alumina no grão 1,0µm para o polimento. Para realizá-la, a análise de topografia da camada superficial foi depositada uma camada (de 18 a 20 nm) de ouro por processo de Sputtering na superfície das amostras

Após o lixamento, polimento e a aplicação da camada de ouro no topo, as amostras foram colocadas no microscópio eletrônico de varredura modelo JEOL JXA 840A do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. O objetivo da microscopia eletrônica de varredura foi de determinar diferenças das camadas de anodização dura X pintura KTL.

### 3.7 - Medição de Dureza

As amostras selecionadas foram retiradas de uma peça que tem o tratamento anodização dura e de uma peça com pintura KTL. Na peça que tem o tratamento de anodização dura foram feitas amostras da região que apresentou cavitação e de região que não apresentou a cavitação. Após o lixamento as peças foram colocadas no Durômetro HV 10 – Dureza Vickers com carga de 25 kgf e tempo de 20 segundos.

**Fase 4** - Compreende a avaliação dos impactos da proposta avaliada e verificação dos benefícios esperados, identificados quando da análise de viabilidade de projeto.

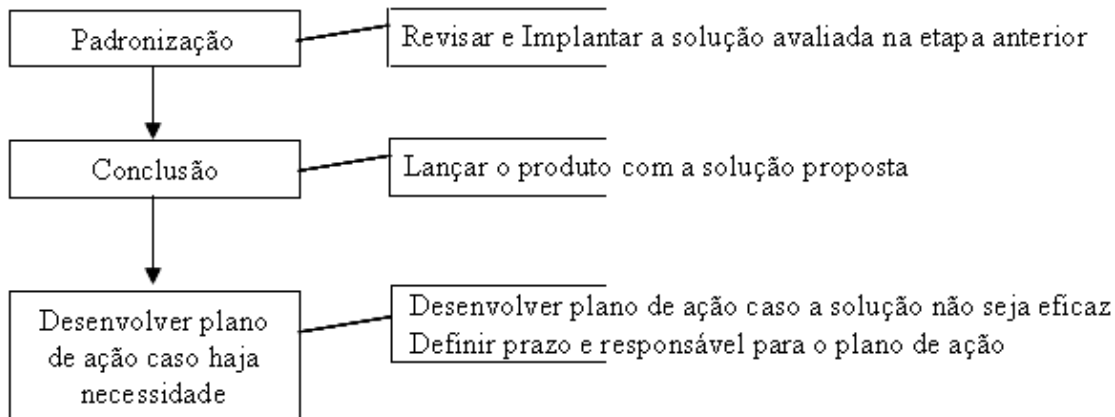


Figura 3.3.4 – Detalhamento do PDCA – Parte 4

### 3.8 - Diagrama de Causa e Efeito

Como forma de avaliar a cavitação na tubulação de água optou-se pela elaboração de um diagrama de causa & efeito conforme Figura 3.4, para definição das possíveis causas potenciais bem como fornecer dados claros para realização de um bom planejamento.

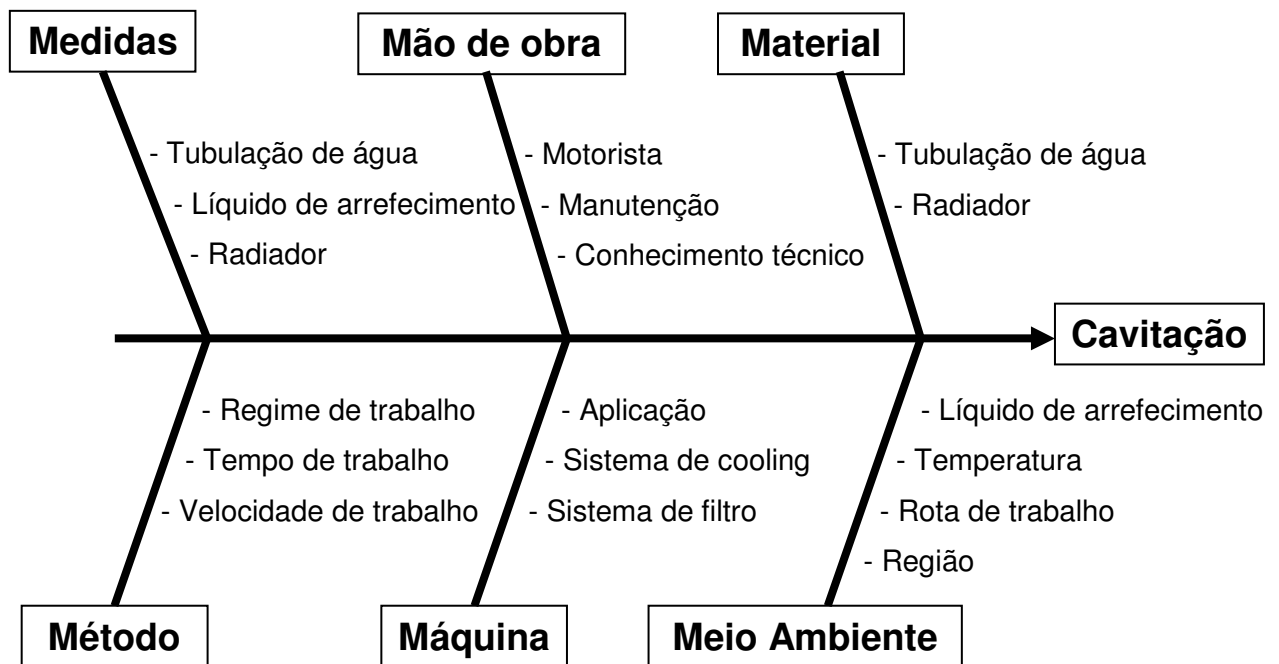


Figura 3.4 – Diagrama Causa & Efeito

## 4 RESULTADO E DISCUSSÕES

### 4.1 - Classificação da Falha

Buscou-se identificar qual é o tipo de falha que a tubulação de água apresenta com o modo reclamado de vazamento de água. A classificação dos tipos de falhas apresentadas no sistema de garantia foi mostrada na Figura 4.1.

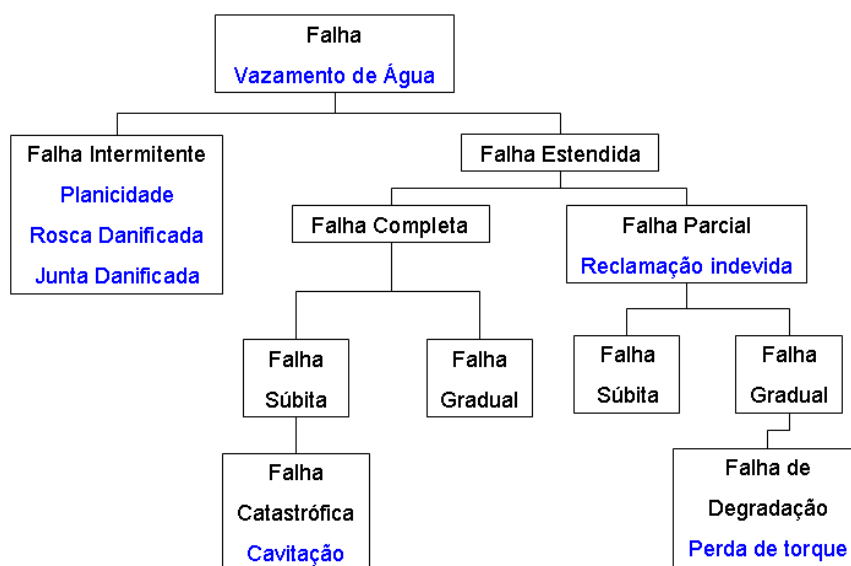


Figura 4.1 – Classificação da falhas

Conforme mostra a Figura 4.1 o efeito da cavitação, é uma falha catastrófica, ou seja, o motor para de funcionar se a tubulação de água tiver o nível de cavitação acentuado podendo até perfurar a parede do tubo. Para as outras falhas recomendam-se trabalhos futuros.

### 4.2 - Estratificação do Modo de Falha Cavitação

Analisando os dados do modo de falha da cavitação buscou-se junto ao departamento de qualidade e garantia as seguintes estratificações:

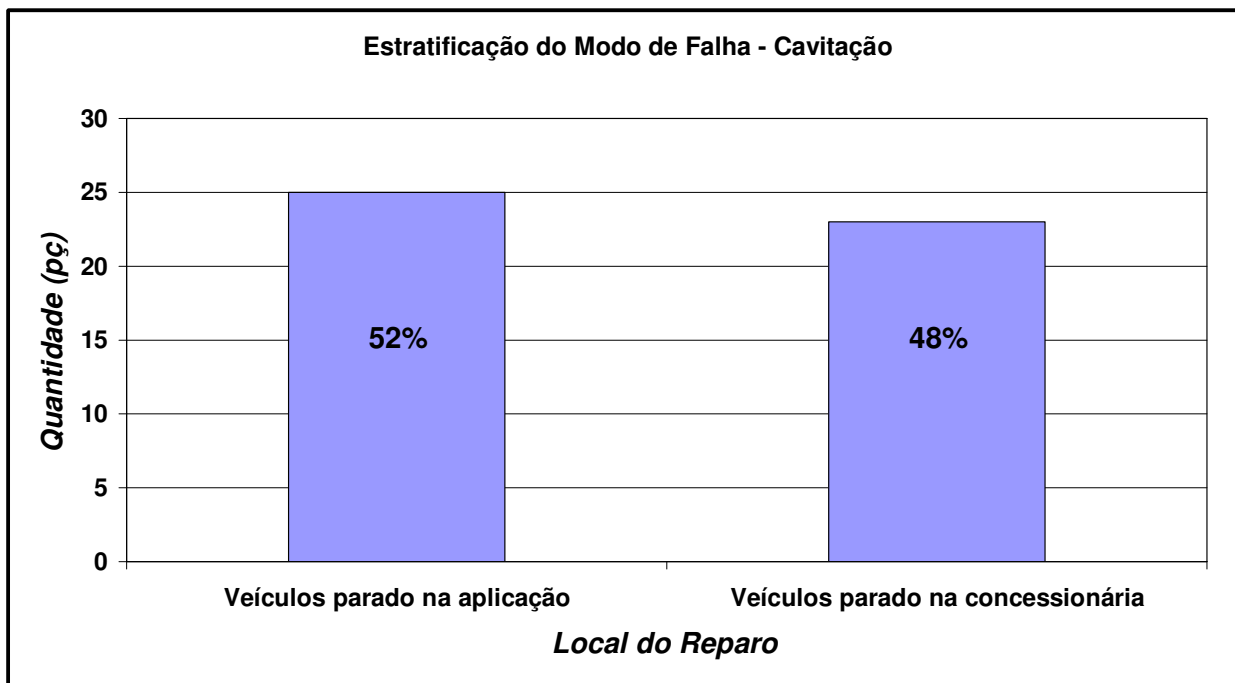


Figura 4.2 – Estratificação do modo de falha pelo local de reparo

Na Figura 4.2 é mostrado que a quantidade de motores que foram reparados na concessionária ou na própria aplicação (local de uso do veículo) são próximos. Sendo assim as tubulações de água que apresentarem o modo de falha de cavitação poderão ser reparadas na concessionária ou na própria aplicação de uso. Em casos de aplicações de motores estacionários o transtorno seria enorme, pois o mesmo teria que ser levado para a concessionária, para que esta realize o reparo.

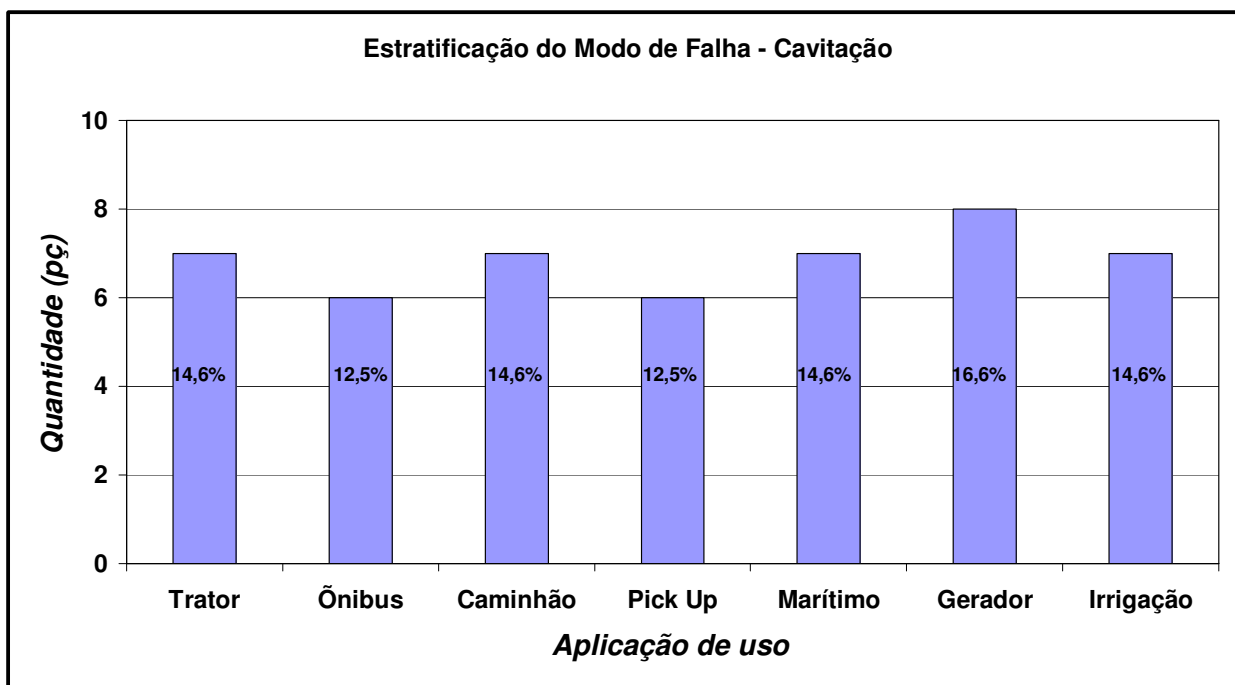


Figura 4.3 – Estratificação do modo de falha por aplicação

Como mostrado na Figura 4.3 pode-se observar que o modo de falha não está concentrado, ou seja, não temos a tendência de falha de cavitação da tubulação de água em uma única aplicação.

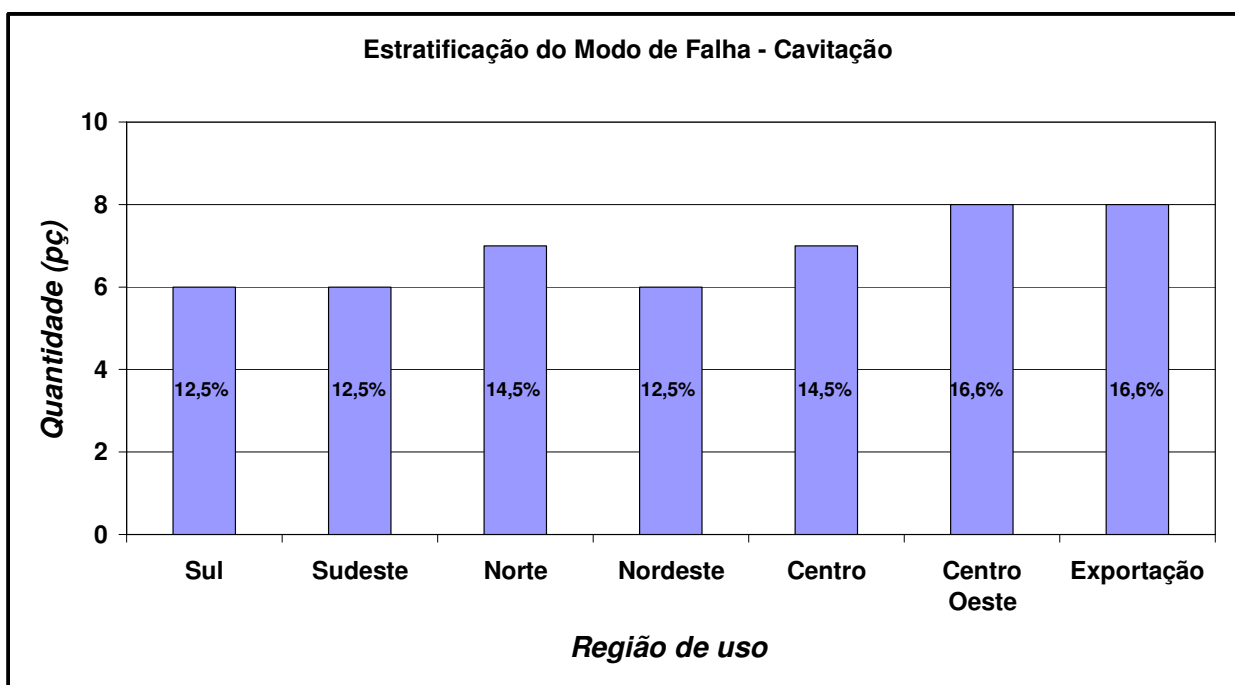


Figura 4.4 – Estratificação do modo de falha por região

Na Figura 4.4 observa-se que a tubulação de água não apresenta tendência de falha em uma região específica, ou seja, o uso do motor em determinadas regiões não é responsável pela falha da cavitação da tubulação de água. Este gráfico é de extrema importância, pois se na ocorrência de uma concentração de qualquer modo de falha em uma determinada região, o Departamento de Engenharia de Desenvolvimento e Aplicações realizará medições que interpretarão o modo de uso do motor para retroalimentar o FMEA de projeto.

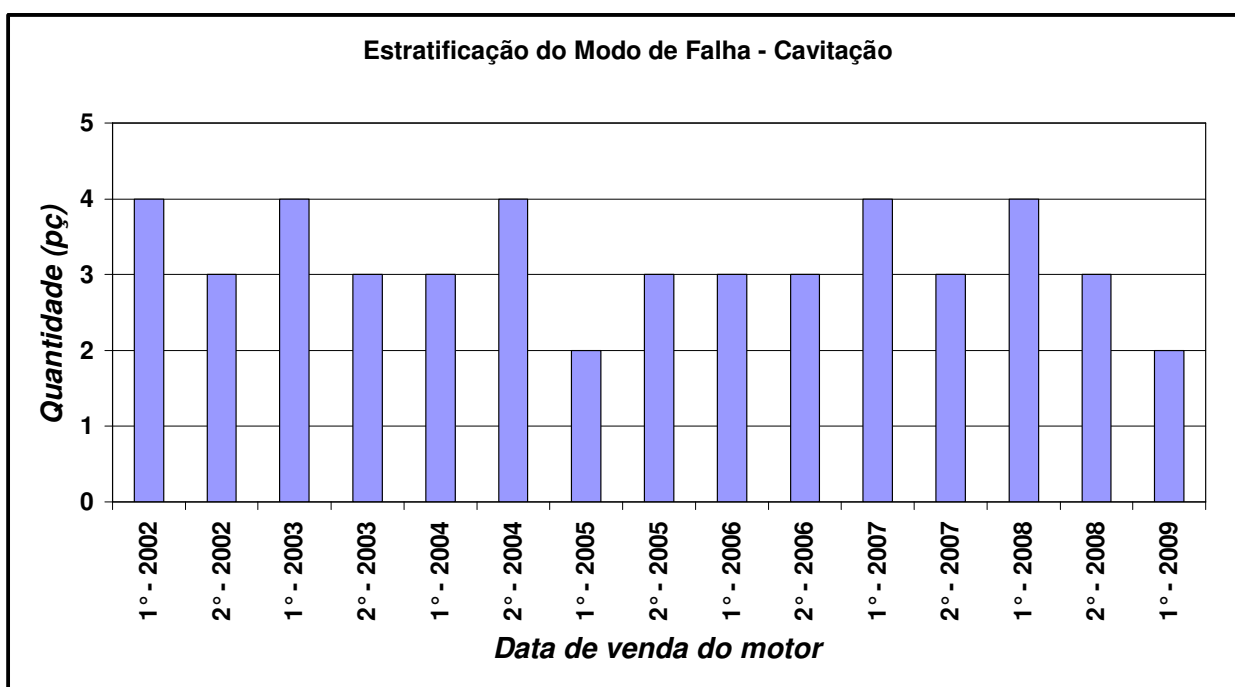


Figura 4.5 – Estratificação do modo de falha por data de venda

Na Figura 4.5 são exibidas as datas de venda dos motores que apresentaram a falha de cavitação na tubulação de água. Como os valores são próximos podemos afirmar que não temos problema de montagem ou de matéria prima. Este gráfico é de suma importância, pois se apresentar uma concentração de algum modo de falha em específico em determinado período do ano o departamento da qualidade realizará uma auditoria na linha de montagem e aos fornecedores dos respectivos itens comprados.

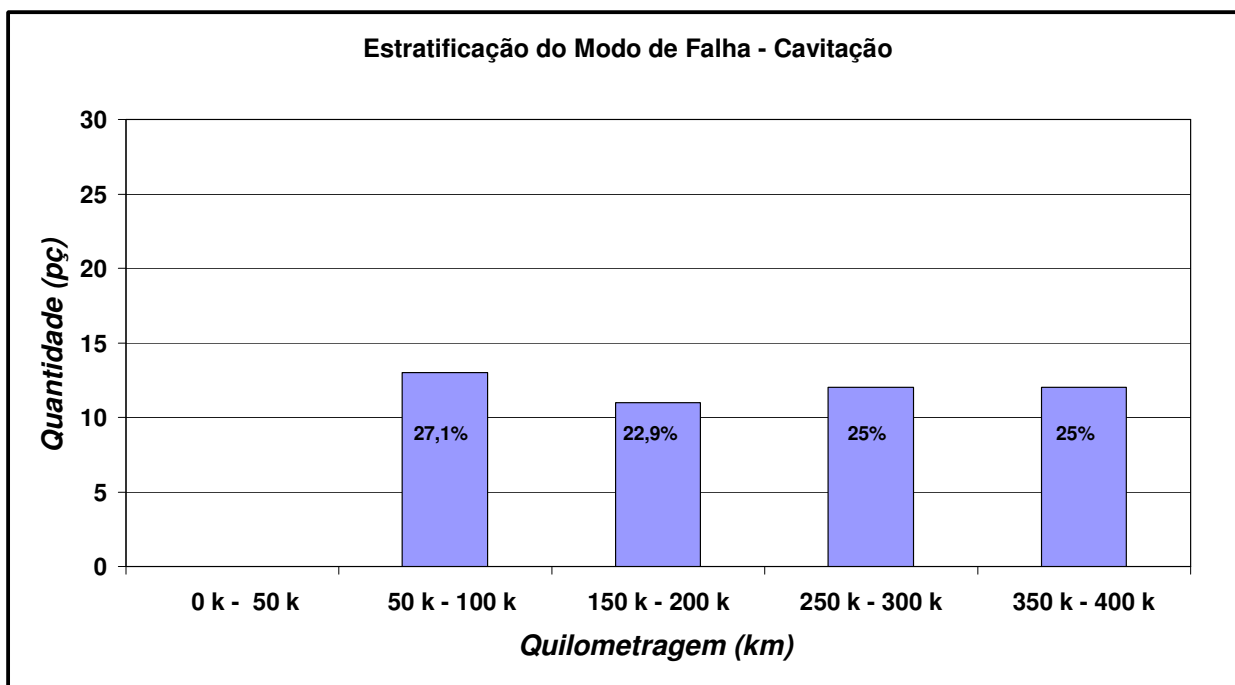


Figura 4.6 – Estratificação do modo de falha por quilometragem

Na Figura 4.6 é apresentado o modo de falha de cavitação da tubulação de água em função da quilometragem, observa-se que o motor não apresenta tendência de falha em uma determinada quilometragem. Este gráfico é muito importante porque se os motores apresentarem alguma falha em uma mesma quilometragem o departamento de engenharia de desenvolvimento e aplicações em conjunto com o departamento de garantia realizarão um acompanhamento com o cliente para entender o modo de falha.

Como apresentado nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 não foi encontrada nenhuma tendência quanto à aplicação, região, data de fabricação e quilometragem decidiu-se elaborar um diagrama de causa e efeito para avaliar quais os outros fatores contribuem para a cavitação da tubulação de água

#### 4.3 – Resultado da Avaliação do Diagrama Causa & Efeito

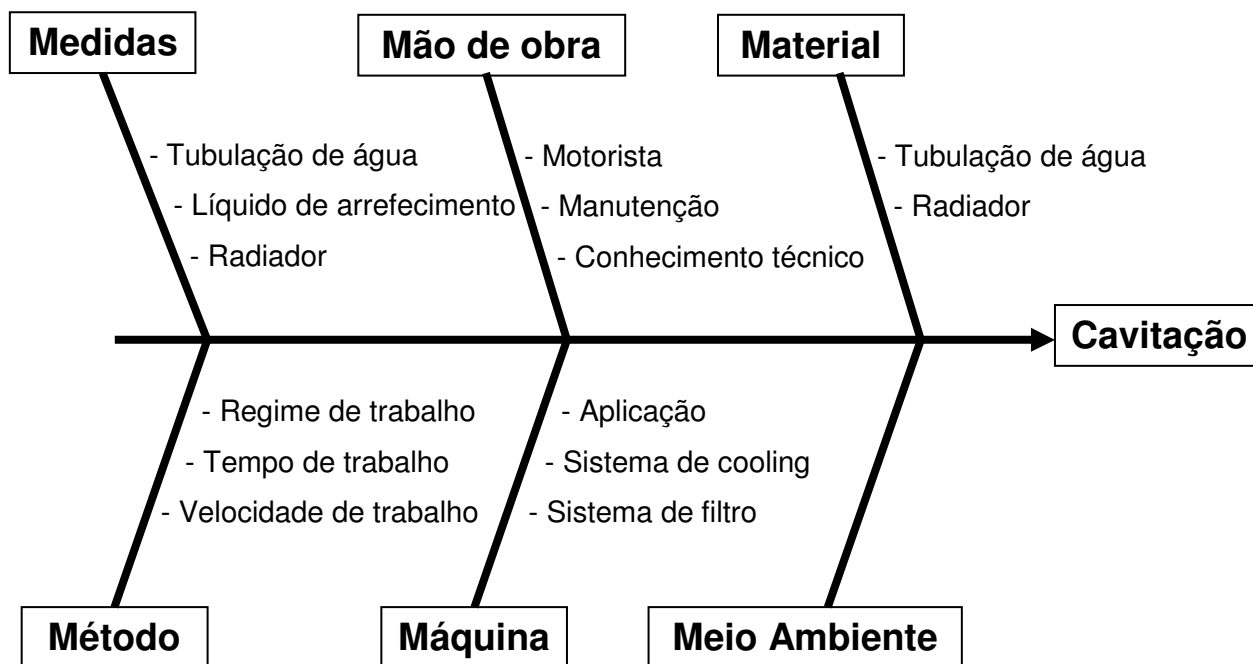


Figura 4.7 – Diagrama Causa & Efeito

##### A - Medidas:

**Tubulação de água:** Através da auditoria de recebimento, verifico-se que as peças tem um controle por amostragem e se alguma peça for encontrada fora do dimensional todo o lote é devolvido para o fornecedor, porém as peças falhadas apresentaram uma média de dureza de 93,5 HV10 e com desvio padrão de 1,2 HV10.

**Líquido de Arrefecimento:** Se o nível do líquido se encontrar abaixo do especificado o motor tem um sistema de segurança que limita a potência e acender uma luz amarela no painel do veículo. Quando esta lâmpada acender, o motorista deverá seguir direto para uma oficina, pois o veículo está com alguma irregularidade. Tal teste pode ser comprovado com qualquer veículo que utilize o motor da MWM

**Radiador:** Este componente é mandatório e pode ser apontado como o responsável pelo correto funcionamento da refrigeração do líquido de arrefecimento. O veículo não funciona sem o radiador. Se o radiador apresentar qualquer falha no seu funcionamento o motor tende ficar mais

quente e conseqüentemente irá acender uma luz no painel do veículo. Caso o motorista insista em continuar o seu trajeto, danos maiores irão ocorrer ao motor.

## **B - Método:**

**Regime de trabalho:** Através das validações realizadas com todas as aplicações para o motor MWM, o modo de falha não é característico de um determinado regime de trabalho.

**Tempo de trabalho:** O motor não tem um determinado período para funcionamento. Usualmente algumas aplicações, como geradores funcionam 24 horas por dia, sem parar.

**Velocidade de trabalho:** Esta causa é similar a causa do tempo de trabalho, o motor não tem um determinado período ou determinada velocidade, até porque aplicações em que o motor é estacionário, ou seja, ele não se move. Para que estas aplicações não apresentem um superaquecimento faz-se necessário a instalação de um bom sistema de cooling.

## **C - Mão de obra:**

**Motorista:** Os motoristas recebem um treinamento de como se deve conduzir um veículo, principalmente quando se menciona frota ou grandes empresas. O motorista que tiver melhor desempenho, ou seja, no período de 30 dias o que apresentar o melhor resultado de consumo de combustível, sem reclamação ou dano para o veículo terá um bônus no seu salário do mês.

**Manutenção:** Buscou-se treinar todos os centros de revenda e oficinas credenciadas, pois isto mantém o cliente fiel a sua marca, e também demonstra que com a correta manutenção do veículo a durabilidade será maior.

**Conhecimento Técnico:** Através de palestras e encontros semestrais com os centros de revenda a MWM aproveita e reforça a importância de treinar os mecânicos para a correta manutenção dos veículos.

#### **D - Máquina:**

**Aplicação:** Através das validações realizadas com todas as aplicações para o motor MWM o modo de falha não é característico de uma determinada aplicação em específico. Se fosse conseqüentemente iria se analisar qual a diferença nesta aplicação.

**Sistema de Cooling:** Através das validações realizadas com todas as aplicações para o motor MWM o modo de falha não é característico de um sistema de cooling em específico. Este sistema é um conjunto de componentes que juntos são responsáveis pela refrigeração do motor.

**Sistema de Filtro de Ar:** Através das validações realizadas com todas as aplicações para o motor MWM o modo de falha não é característico de um sistema de filtro de ar. Este sistema é responsável pela entrada de ar do motor, caso ocorra uma falha neste sistema ascenderá uma luz amarela no painel do veículo. Quando esta lâmpada acender, o motorista deverá seguir direto para uma oficina, pois o veículo esta com alguma irregularidade, usualmente para este caso deve-se substituir o elemento filtrante de ar.

#### **E - Meio Ambiente:**

**Temperatura:** Através das validações realizadas, em regime extremo, em todas as aplicações a temperatura do meio não deve interferir no correto funcionamento do sistema de arrefecimento do motor, pois o sistema de arrefecimento foi desenvolvido para trabalhar independentemente da temperatura ambiente em que se encontra.

**Rota de trabalho:** Através das validações realizadas com todas as aplicações e principalmente em regime extremo o modo de falha analisado não é uma rota em específico. Se fosse conseqüentemente iria se analisar qual a diferença que a rota em questão tem, comparada com as já validadas. Caso seja necessário, esta rota será incluída no plano de validação.

**Região:** Na estratificação realizada, não se observou nenhuma região em destaque. As falhas apresentadas não são exclusivas de uma região, Se fossem, conseqüentemente iria se analisar qual a diferença desta região.

**Líquido de Arrefecimento:** Este é responsável em manter a temperatura de trabalho do motor, mantendo o correto funcionamento, desta forma a correta manutenção é mandatória. No caso específico dos motores MWM a limpeza, ou seja, a troca deste líquido de arrefecimento

deve ser feita no mínimo com 50.000km ou 1 ano. As tubulações de água analisadas que apresentaram a cavitação não estavam com esta característica, sendo assim a tubulação de água estava em uma condição de trabalho não prevista em projeto.

#### **F - Material:**

**Radiador:** Este componente é mandatório e pode ser apontado como o responsável pelo correto funcionamento da refrigeração do líquido de arrefecimento. O veículo não funciona sem o radiador. Se o radiador apresentar qualquer falha de material e ou projeto o seu funcionamento irá comprometer o motor, com isso o motor tende ficar mais quente conseqüentemente irá acender uma luz no painel do veículo. Caso o motorista insista em continuar o seu trajeto, danos maiores irão ocorrer ao motor.

**Tubulação de água:** Em decorrência do modo de falha apresentado foi realizada uma caracterização de uma peça falhada na região que apresenta cavitação e outra região que não apresenta cavitação e também de uma peça nova para observar se temos falha de material da fundição.

#### **4.4 - Ensaio de Fluorescência de Raios - X**

Na Tabela 4.1 demonstra-se o resultado encontrado da análise por fluorescência de raios X. A composição química desta liga em porcentagem de massa determinada esta descrito abaixo.

Tabela 4.1 – Composição química da liga Al-Si- 10 Mg (a) T6

|                                  | Mínimo   | Máximo       | Encontrado     |
|----------------------------------|----------|--------------|----------------|
| <b>Si</b>                        | 9,00 %   | 11,00 %      | <b>9,40 %</b>  |
| <b>Fe</b>                        | 0,00 %   | 0,55 %       | <b>0,33 %</b>  |
| <b>Cu</b>                        | 0,00 %   | 0,05 %       | <b>0,03 %</b>  |
| <b>Mn</b>                        | -        | 0,45 %       | <b>0,00 %</b>  |
| <b>Mg</b>                        | 0,20 %   | 0,45 %       | <b>0,31 %</b>  |
| <b>Cr</b>                        | -        | -            | <b>0,00 %</b>  |
| <b>Ti</b>                        | 0,00 %   | 0,15 %       | <b>0,15 %</b>  |
| <b>Ca</b>                        | -        | -            | <b>0,00 %</b>  |
| <b>Zn</b>                        | 0,00 %   | 0,10 %       | <b>0,02 %</b>  |
| <b>Sr</b>                        | -        | -            | <b>0,01 %</b>  |
| <b>Al</b>                        | Restante |              | <b>89,80 %</b> |
| <b>I.S. % Fe + 2* Mn + 3* Cr</b> |          | <b>1,5 %</b> | <b>0,33 %</b>  |

#### 4.5 - Ensaio com o Microscópio Ótico

Serão apresentadas a seguir as imagens da microestrutura da tubulação de água em material Al-Si-10 Mg de peças com cavitação e peças novas sem cavitação. Realizou-se análise em microscópio ótico comparando a estrutura do material na região de cavitação e de outra região aonde não apresentou a cavitação. Esta análise foi feita em uma mesma peça para constatar se existia alguma diferença da microestrutura.

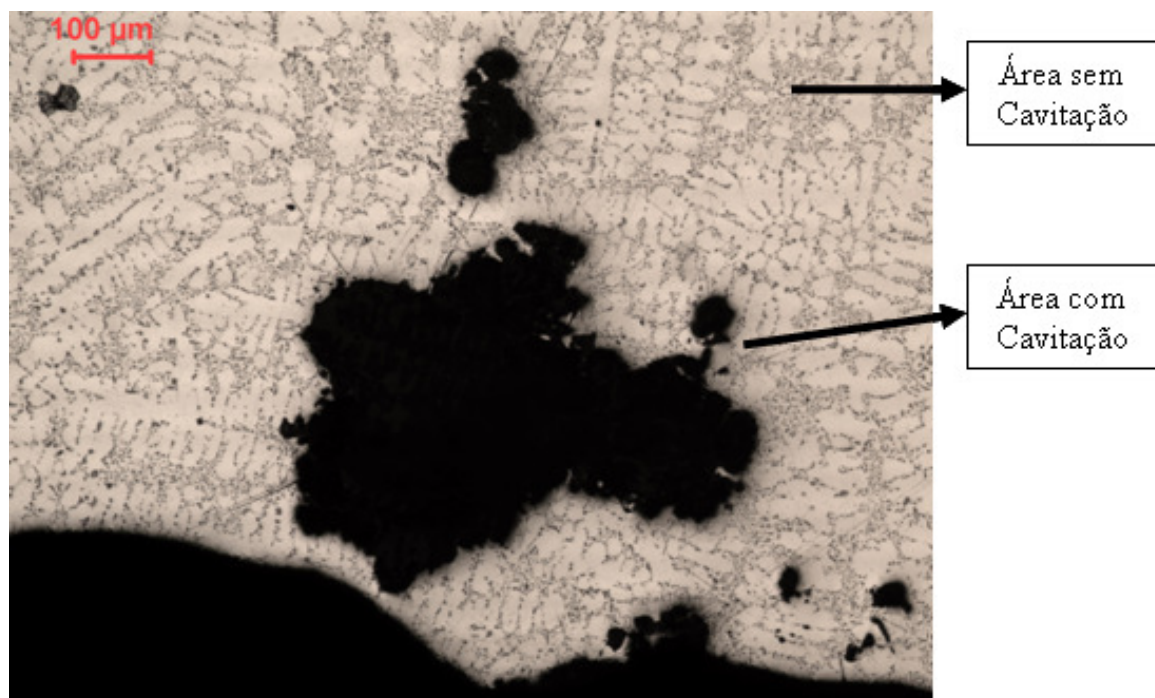


Figura 4.8.1 – Área com cavitação de uma peça falhada

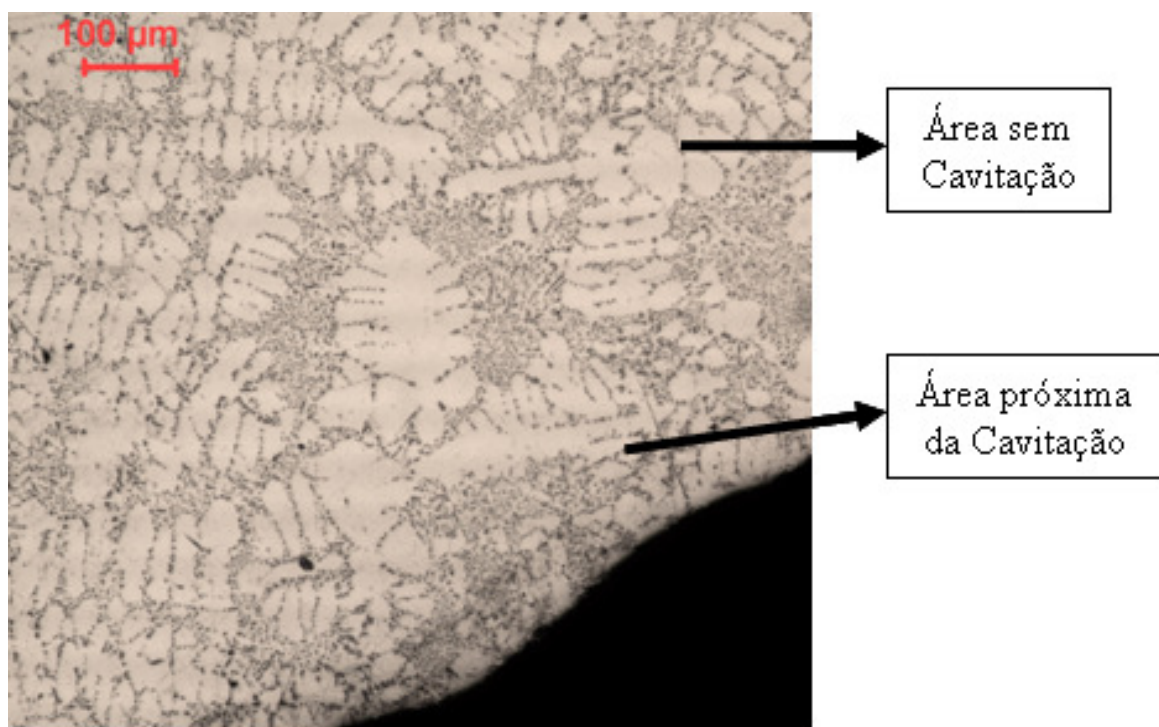


Figura 4.8.2 – Área sem cavitação de uma peça falhada

Conforme observado nas Figuras 4.8.1, 4.8.2 e 4.9 as microestruturas são idênticas, ou seja, apresentam formação das dendritas de alumínio (Fase  $\alpha$ ), eutetico de Si Globular presentes ( $\alpha + \text{Si}$ ) e óxidos ausentes. Portanto o problema não se encontra no processo de fundição.

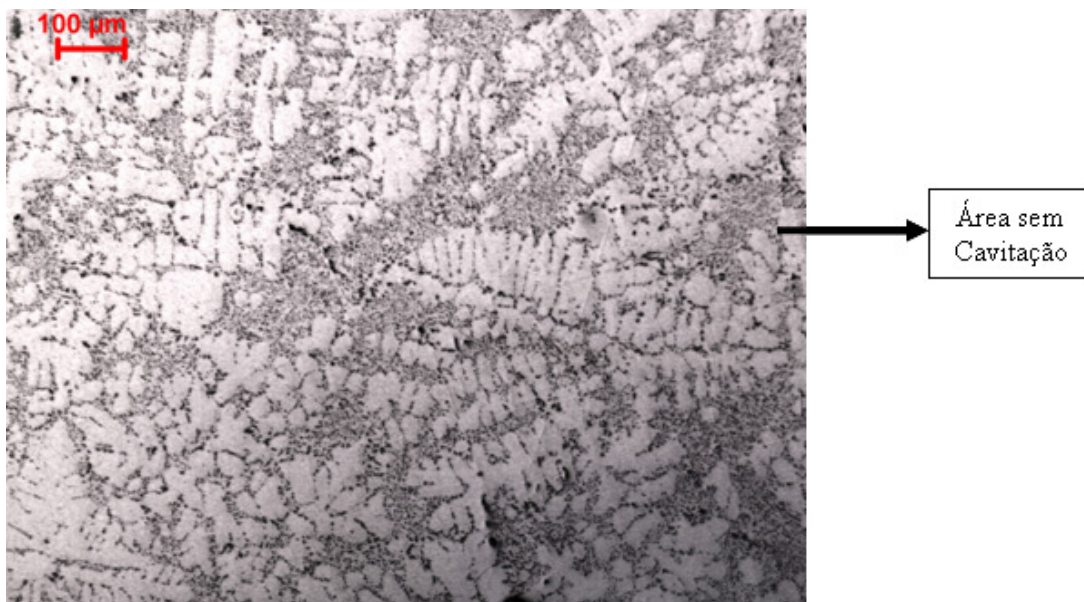


Figura 4.9 – Área sem cavitação de uma peça nova

Com complemento da análise metalográfica foi realizada uma microscopia eletrônica por varredura e observou-se que a camada de anodização dura na parte interna da Tubulação não estava uniforme podendo até encontrar regiões sem camada, conforme mostrado na Figura 4.10.1. Outro impacto observado é que devido à camada de anodização dura não estar uniforme o material base fica exposto, ou seja, em contato com o líquido de arrefecimento

#### 4.6 - Ensaio com o Microscópio Eletrônica de Varredura

Serão apresentadas as imagens da camada de proteção superficial (anodização dura e pintura KTL) de topo e perfil.

A camada de anodização dura não é uniforme, ou seja, a barreira de óxido não se formou completamente e em determinadas regiões se formou além do necessário, conforme mostra as Figuras 4.10.1, 4.10.2 e 4.10.3.

Estas falhas da camada de anodização dura ocorreram devido às seguintes fatores:

- À presença das partículas de Si que impede a formação uniforme do filme de óxido;
- Design da peça e por necessitar anodização nas partes internas da tubulação de água;
- Camada que foi mal depositada devido ao processo de anodização ser manual.

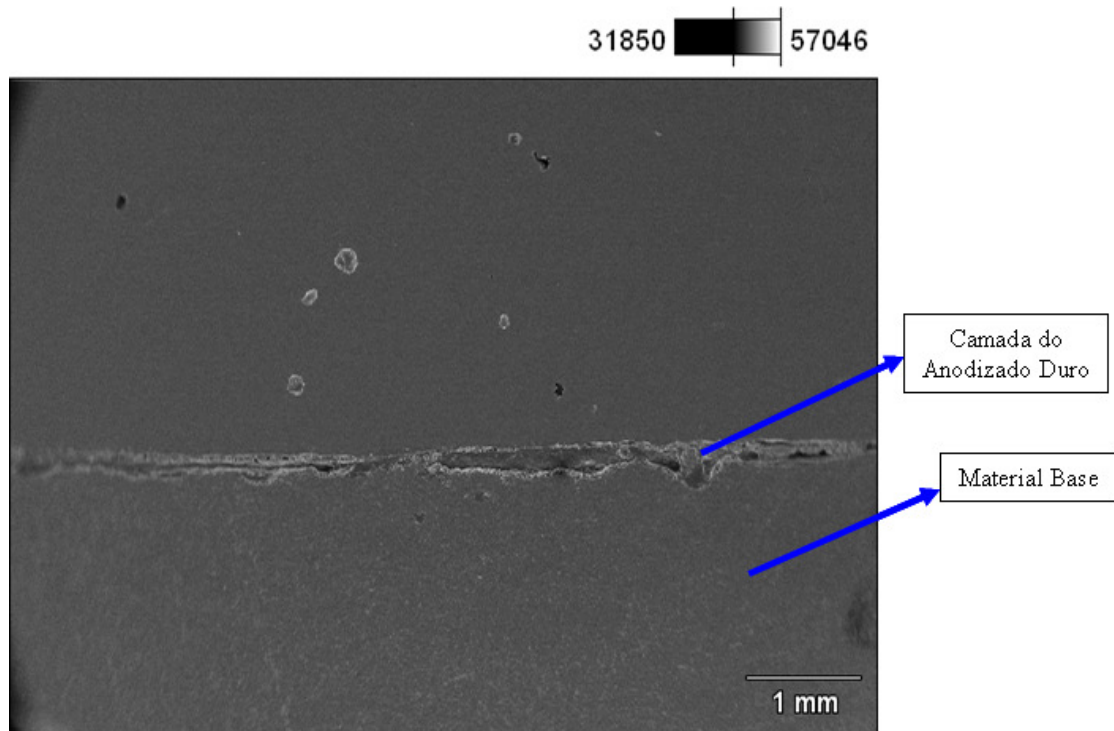


Figura 4.10.1 – Detalhe da camada mal depositada

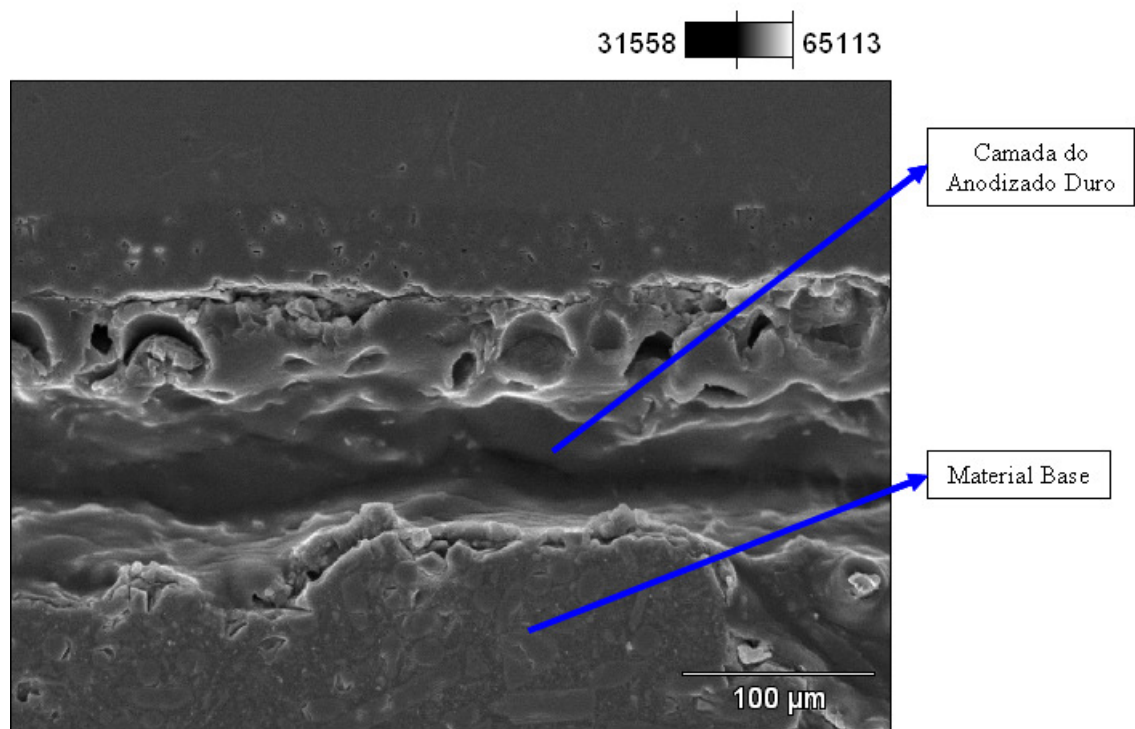


Figura 4.10.2 – Análise da camada da anodização dura

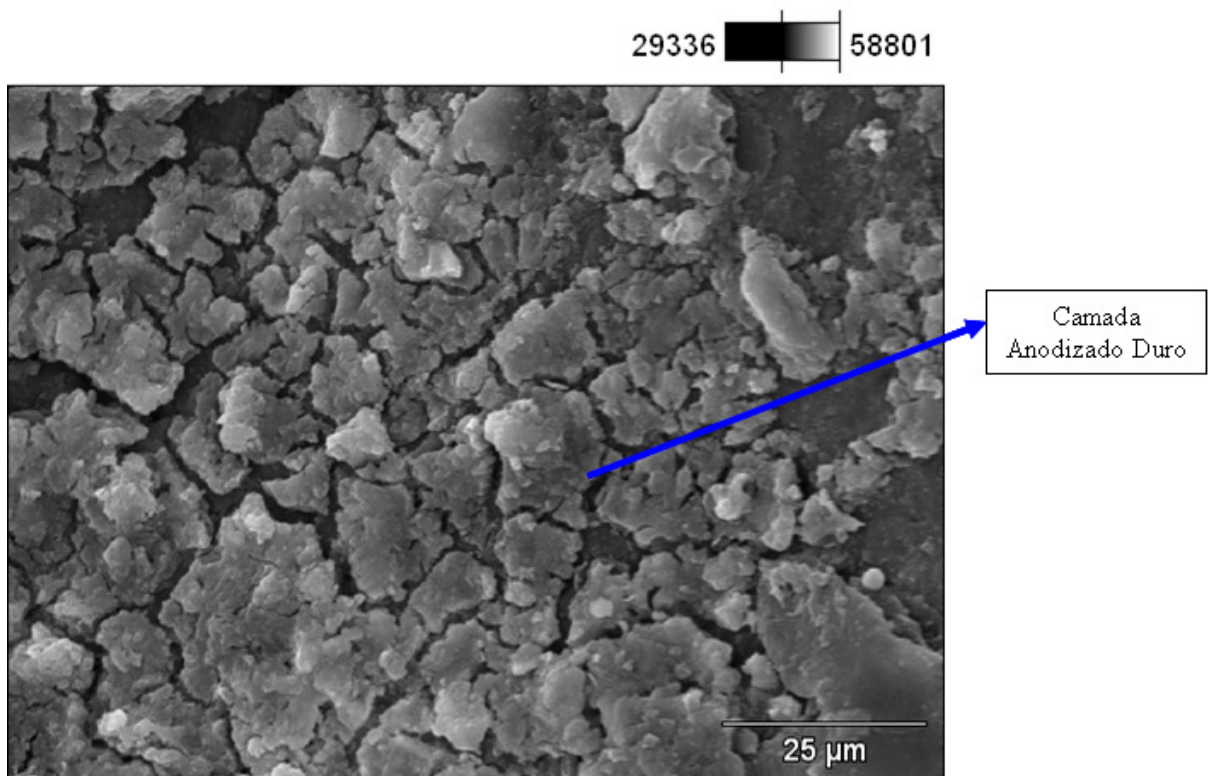


Figura 4.10.3 – Camada anodização dura vista de topo

A composição do material base é Al - Si - 10 Mg, como já foi observado o Si não é recomendado para peças que terão que ser anodizadas e a tubulação de água deve ser anodizada principalmente na região interna, pois é aonde o líquido terá contato. Com isso verificou-se o processo de anodização no fornecedor e foi constatado que o processo tem deficiências tanto na operação de anodizar como na operação de selar.

Para minimizar esta porosidade segue como sugestão para trabalhos futuros propor uma nova liga de Al que apresente uma porosidade menor.

Devido a anodização dura não estar com a camada uniforme, foi preparada 5 tubulações de água com a proteção superficial de KTL, focando a análise no processo de pintura KTL e camada uniforme

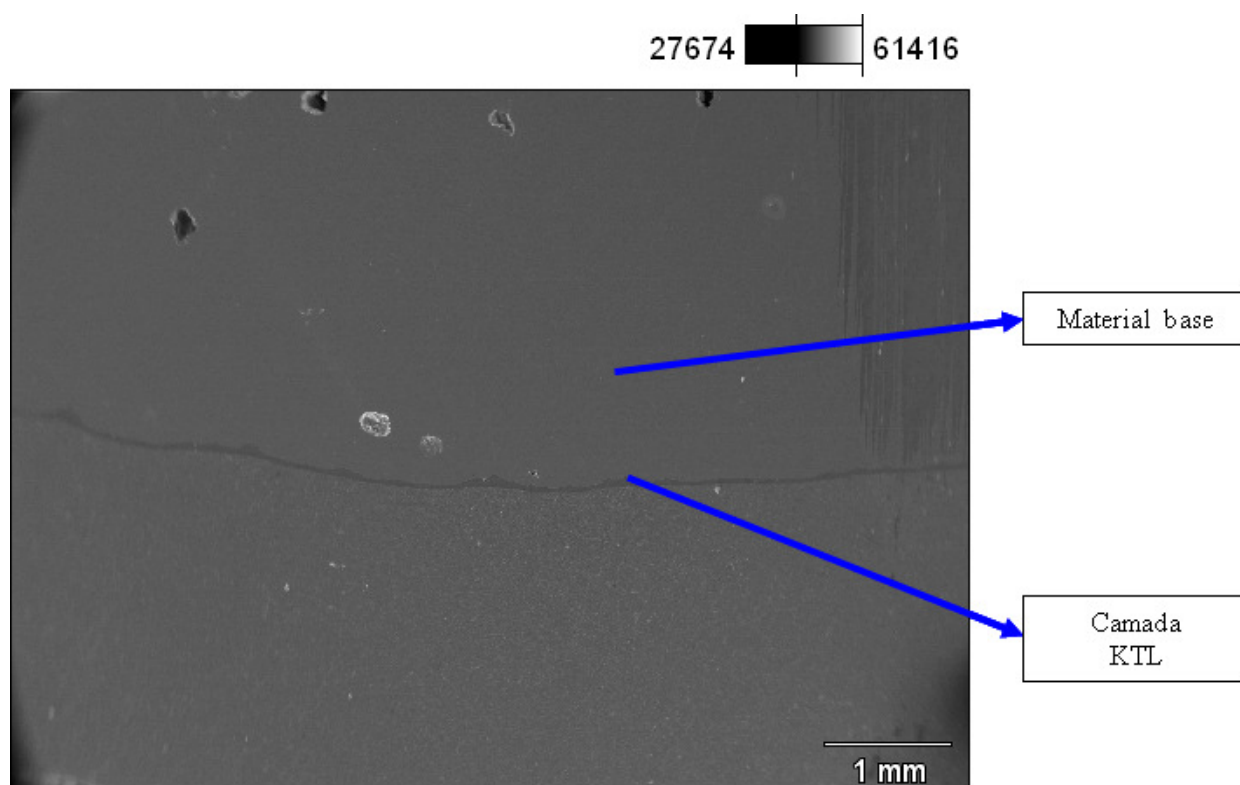


Figura 4.11.1 – Análise da camada da pintura KTL

Com o objetivo de evitar que o líquido de arrefecimento tenha contato com o material base a pintura KTL demonstrou melhor uniformidade na aplicação da parte interna da tubulação de água, conforme Figura 4.11.1.

A camada de pintura KTL é uniforme tanto no contorno como na parte interna conforme Figura 4.11.2. A espessura mínima encontrada na camada de pintura KTL foi de 38 $\mu$ m.

A Figura 4.11.2 mostra que a pintura KTL também tem a função de deixar a peça com um melhor acabamento, preenchendo as imperfeições que uma peça fundida em areia tenha.

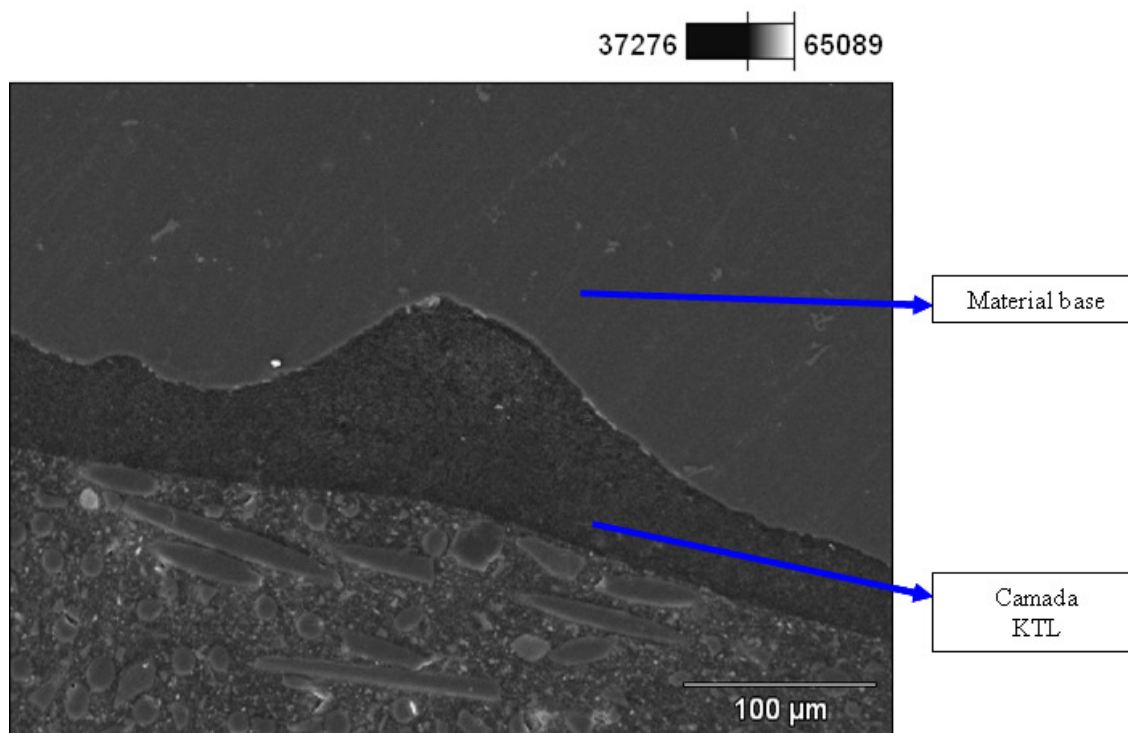


Figura 4.11.2 – Análise da camada pintura KTL

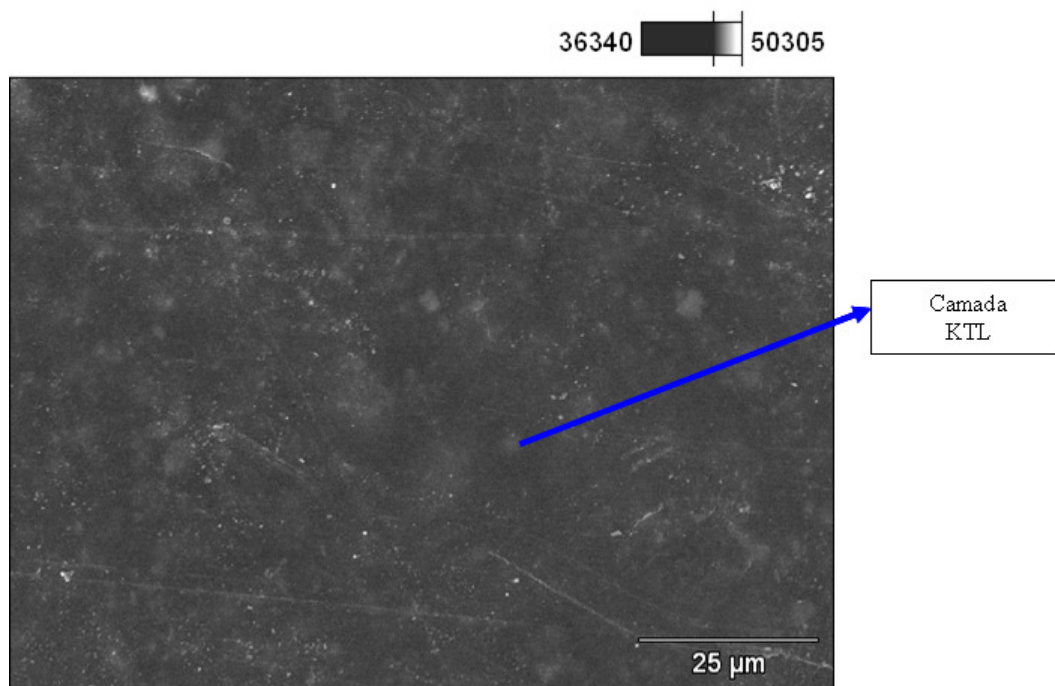


Figura 4.11.3 – Camada da pintura KTL vista de topo

Na Figura 4.11.2 é possível observar que toda a área do material base está com a pintura KTL e com uma camada uniforme. A melhoria na eficácia deste processo pode ser atribuída ao melhor poder de penetração na área interna da peça por se tratar de um processo automatizado.

#### 4.7 - Análise do FMEA de Processo

O RPN do FMEA de processo para a operação de anodizar é de 112 e não tem plano de ação recomendada. O controle da detecção é feito visualmente pelo próprio operador. A causa e o potencial de falha são funções do operador. (Anexo A1).

O RPN do FMEA de processo para a operação de selagem é de 84 e não tem plano de ação recomendada. O controle da detecção é um cronômetro controlado pelo próprio operador e a causa potencial de falha são funções do operador. (Anexo A2).

Já para o processo de pintura KTL todo o processo é automatizado o operador só tem a função de colocar a peça na esteira e retirar após a finalização da Pintura KTL. No processo de pintura KTL é controlada uma peça a cada turno de trabalho, principalmente quanto à espessura da camada de KTL.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 - Resultados

Através das avaliações realizadas no microscópio eletrônico de varredura o modo de falha de vazamento de água se dava devido à camada de anodização dura não estar com a espessura mínima requerida e em especial com a combinação do líquido de arrefecimento não estar com a especificação correta, ou seja, realizar a troca a cada doze meses ou 50.000 km.

Como todo e qualquer sistema de garantia em específico a tubulação de água deve atender aos requisitos de durabilidade, mesmo nos casos em que os clientes não realizarem as manutenções periódicas, conforme recomendado nos manuais dos veículos.

Ao longo deste processo observou-se que a tubulação de água que apresentou cavitação, devido à camada de anodização dura não estar uniforme no contorno da peça, principalmente na área interna. Para minimizar o problema de cavitação recomenda-se aplicar a pintura KTL, pois a mesma apresenta uma melhor uniformidade tanto na camada interna como no contorno da peça.

Dentre as inúmeras vantagens mencionadas na revisão bibliográfica, vale ressaltar que a pintura KTL tem o custo mais barato comparado com o da anodização dura. Apesar das vantagens constatadas, a pintura KTL deverá ser a última operação do processo de usinagem, pois a mesma só poderá ser realizada com a proteção das roscas e furos com tolerância, evitando assim retrabalho da peça.

Em síntese, considera-se a pintura KTL como proposta para minimizar a cavitação da tubulação de água nos motores.

Atualmente tem-se 5 veículos em teste com a tubulação de água com proteção KTL. Até o momento os veículos não apresentaram o modo vazamento de água. Estes veículos já apresentaram outros modos de falhas que não estão associados à pintura KTL na tubulação de água.

## **5.2 - Propostas para futuros Trabalhos:**

Durante o desenvolvimento deste trabalho de dissertação, sugeriram idéias de oportunidades para vários assuntos, que poderiam ser tema ou integrarem futuros trabalhos. Seguem algumas idéias levantadas

- Proposta de novo design;
- Estudo de anodização com outras ligas de alumínio;
- Estudo da tubulação de água em material de polímero;
- Estudo da tubulação de água em material de ferro fundido;
- Aplicação do white coat na tubulação de água de alumínio;
- Aplicação do green coat na tubulação de água de alumínio;
- Aplicação do KTL após anodização dura

## Referências

- ABBOTT, J.S. Hard coat Anodizing – low - cost. Coating for aluminum. Advanced Materials & Process. v 146. Third Edition. 29-33 p. September 1994.
- AGUIAR, Silvio. Integração das Ferramentas da Qualidade ao PDCA e ao programa Seis Sigma. 1º edição. 24 p. Belo Horizonte 2002.
- ALWITT, Robert S. Anodizing. Boundary Technologies Inc. Northbrook IL 60065-0622: USA December 2002.
- BARROS. Adail Filho. Utilização de Ferramentas de Confiabilidade em um Ambiente de Manufatura de Classe Mundial. 2003, f103. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- BASSUHUUSEN, Richard Van Modern Engine Technology From A to Z Handbook, SAE International, First Edition. 114 p., USA, 2006
- BOSCH, Robert. Diesel Accumulator Fuel –Injection System Common Rail. 1º edition. 34-49 p. São Paulo 1999.
- BOSCH, Robert. Diesel Engine Management. 2º edition. 213-236 p. São Paulo 1999.
- BRUNETTI, Franco. Apostila Curso Mecânica dos Fluidos. 2º edição. 73-84 p. Março 1985.
- CAMPOS, Vicente Falconi. Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia. 194-203 p. Belo Horizonte 2001.
- CARVALHO, Luis Fernando Pereira. A indústria de autopeças. Falando de Qualidade, São Paulo, v.XIV, n.152.52-58 p. jan 2005.

- COTELL, C.M. and SPRAGUE, J.A. and SMIDT, F.A.J. Overview of Wear and Erosion testing. ASM Handbook – Surface Engineering. v.5. 679-680 p. 1994.
- DAVIES, J.A., ET AL. The migration of metal oxygen during anodic film formation. Journal of Electrochemical Society, V.112, n. 7, 675-680 p. 1965
- DEELP, Apostila de PINTURA KTL. Sistema KTL General Motors do Brasil LTDA . São Paulo 2007.
- DIN 1688. Norma da Tolerância de fundição, DIN 1688 GTA 15/5 B23.
- EM 1706. European Standard, EM 1706: 1997 has the Status of a DIN Standard.
- FRANÇA, Junia Lessa e VASCONCELLOS, Ana Cristina. Manual para Normalização de Publicações Técnico Científicas. 8ª edição. 35-37, 209-213 p. Belo Horizonte 2008.
- FRATILA , Apachitei, L.E. and DUSZCZYK, J. and KATGEMAN, L. Voltage Transients and Morphology of Al - Si (Cu) anodic oxide layers formed in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at low temperature. Surface and Coatings Technology. v.157. 1ª edition. 80-94p. 2002.
- FUOCO, Ricardo. Apostila do curso de Fundição IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo 2003.
- GENTIL, Vicente. Corrosão. 5ª edição. 123-203 p. São Paulo 2007.
- GONZÁLEZ, J.A. et al. Characterization of porous aluminum oxide films from a.c. impedance measurements. Journal of Applied Electrochemistry. v. 29. 229-238 p. February 1999.

- GOODSELL, Don. Dictionary of Automotive Engineering. 2° edition. 3, 5, 61, 62, 63, 79-80, 172, 237 - 238, 246 p. Jan. 1995.
- HABAZAKI, H. et al. Effects of alloying elements in anodizing of aluminum. Transactions of the Institute of Metal Finishing, v. 75. 18-24 p. Part 1. January 1997.
- HABAZAKI, H et al. Formation of amorphous anodic oxide films of controlled composition on aluminum alloys. Thin Solid Films. v. 300. 131-137 p. 1997.
- HODEL, Marcelo Nogueira. Análise Comparativa entre Ensaios Controlados e Aplicações Reais de Pastilhas de Freio de Caminhões. 2010. 115f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- HORITA, F. Trabalho de FMEA. (Disponível na internet via <http://www.fge.if.usp.br/~fhorita/FMEA.htm>. Acesso em 20 junho 2010.
- IRESON, W. Grant. and COOMBS, Clyde F. and MOSS, Richard Y. Handbook of Reliability Engineering And Management. Second Edition. McGraw Hill. Chapter 6. New York. 1995.
- JUNIOR, Alfredo Gbrich. Conheça o seu carro. 1° edição. 17, 20-23, 39, 58, 76, 100-104, 113- 115, 129, 134 p. São Paulo, 1995.
- JUNIOR, Willian D. Calister. Ciência e Engenharia de Materiais. 5° edição. 168-195 p. São Paulo 2002.
- KANAGARAJ, D. and VINCENT, S. and NARASIMHAN, V.L. Advantages of pulse Anodizing of aluminum alloys. International Symposium on Industrial Metal Finishing. Karaikudi. India. 1-5 p. February 1989.

- KELLER, F. and HUNTER, M.S. and ROBINSON, D.L. Structural Features of oxide coatings on aluminum. *Journal of the Electrochemical Society*. v. 100, n. 9. 411-419 p. 1953.
- KONNO, H. and UTAKA, K. and FURUICHI, R. A two step anodizing process of aluminum as means for improving the chemical and physical properties of oxide films. *Corrosion Science*. v. 38. n.12. 2247-2256 p. 1996
- LOPEZ, V. et al. The response of anodized materials sealed in acetate-containing baths to atmospheric exposure. *Corrosion Science*. v.40. n. 4/5. 693-704. 1998
- MCDONALD, Fox Introdução a Mecânica dos fluidos – Fluxo Turbulento.
- MEHL, R. F. Metals Handbook – Atlas of Microstructures of Industrial alloys. Ninth edition. Ohio. American Society for Metals. v. 7. 258 p. 1972.
- MOTORES, Apostila de Conhecimentos básico de motores. 1º edição. Instituto Técnico Mecânico de Canoas.
- NARASIMHAN, V. L. and VINCENT, S. and KANAGARAJ, D. The influence of superimposing varying ratios of pulse current over direct current on hard anodizing of aluminum. *International Symposium on Industrial Metal Finishing*. Karaikudi, India, 159- 161 p. 1989.
- O'CONNOR, P.D.T. Practical Reliability Engineering. John Wiley & Sons. 409 p. 1991.
- PAES, M. A. et al. Effect of benzotriazole on the efficiency of anodizing of Al – Si alloys. *Electrochimica Acta*, v. 42 n. 23, 24. 3453-3459 p. 1997.
- PAKES, A. et al. Development of porous anodic films on 2014-T4 aluminum alloy in tetraborate electrolyte, *corrosion Science*. V. 45. 1275-1287 p. 2003.

- PEDROSO, C. B., Alumínio anodizado colorido – Alguns aspectos fundamentais. 1987. 60f. Dissertação (mestrado em Física) – instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP, Campinas, S.P.
- RAMAKUMAR, R. Engineering Reliability: Fundamentals and Applications. Oklahoma: Prentice, Hall International. 432 p. 1993.
- REGONE, Natal Nerímio. Anodização de Ligas de Alumínio por Corrente pulsada. 2004. 175f.. Tese (Doutorado Acadêmico em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- REIMER, L. Scanning Electron Microscopy: Physics of Image and Microanalysis. Berlin: Springer, 1985.
- ROBERT, S Alwitt. Boundary Techonologies inc. Northbrook, IL 60063 – 0622, USA – December 2002. Norma ASTM – B – 157 – ISO 2931.
- SCAPIN, Carlos Alberto. Análise Sistêmica de Falhas. Belo Horizonte. Editora de Desenvolvimento Gerencial. 1999.
- SHARMA, A. K. et al. Hard anodizing behavior of aluminum alloy DTD 5124 containing varying amounts of impurities under different electrolytic conditions. Plating and Surface Finishing. v. 85. n. 7. 55 p. 1998.
- STAMATIS, D.H. Failure Mode and Effect Analysis. FMEA from Theory to Execution. ASQ Quality Press. Wisconsin. USA. First Edition. 1995.
- STEVENSON, M. F. J. Anodizing. COTELL, C.M. and SPRAGUE, J.A. and SMIDT, F. A. J – Surface Engineering. united States of America. ASM International Handbook Committee, ninth edition. v. 5, 482-493 p. 1994.

- STRACENER, Jerrell T. R.M.S. Reliability Maintainability and Supportability. Third Edition. SAE International RMS Committee (G-11). New York. 1995.
- THOMPSON, G. E. et al. Anodic of aluminum alloys. Aircraft Engineering and Aerospace Technology. v. 71. n. 3. 228-238 p. 1999.
- THOMPSON, G. E. et al. Elastic recoil detection analysis (ERDA), RBS and TEM study of barrier film formation on Al – 4,5 at. % Mg – 0,05 at. % Cu alloy. Surface and Interface Analysis, v. 27. 57-62 p. 1999.
- TR 313, Norma de identificação MWM TR 313 H8 D IC4 AL.
- TR 308, Norma de Estanqueidade MWM TR 308 – AR 3 bar.
- TR 303, Norma de Limpeza MWM TR 303 – D1, 5/m – Z.
- TRICHES, Andre. Anodização. [http://pt.wikipedia.org/wiki/anodização](http://pt.wikipedia.org/wiki/anodiza%C3%A7%C3%A3o). Acesso em 11 março 2010.
- TU, C.G. and HUANG, L. Y. Hard anodizing of 2024 aluminum alloy using pulse DC and AC power. Trans IMF, v. 65. n. 60. 60-66 p. 1987.
- TZOU, R. J. and Shih, H. C. Production and Characterization of the anodic film on Al - 6% Zn – 1%Mg alloy. Surface and Coatings Technology. v. 34. n. 3. 231-241 p. 1988.
- VERECKEN, J. Surface engineering of aluminum alloys. Bulletin of electrochemistry. v. 12. n. 5-6. 249-254 p. 1996.
- WOOD, O’Sullivan., G.C. The morphology and mechanism of formation of porous anodic films on aluminium, Proceedings of royal society of London A, V. 317, 159-161 p., 1970

YIN, R. Estudo de caso - Planejamento e métodos. 2º edição. Porto Alegre. 2001.

YOKOYAMA, K. et al. M. Advantages of Pulse anodizing . Plating and Surface Finishing.  
69. n. 7. 62-65 p. 1982.

## Anexos

### Anexo A.1 Detalhe do FMEA de processo da anodização.

| COPAX                                                   |                                 |                                            |               |                                      |                                                                       |                                     |                                         |                       |       |                                                                    |                     |                     |               |         | FMEA DE PROCESSO                                                                  |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|--|--|--|-------------------------|--|--|--|--|
| Número da Peça (Cliente):<br>9.410.0.912.004.4          |                                 |                                            |               |                                      | Rev./Data Des.:<br>11-01/03/2000                                      |                                     |                                         |                       |       | Nome da Peça:<br>TUBO DE SAÍDA D'ÁGUA                              |                     |                     |               |         | Número da FMEA:<br>054-09                                                         |       |  |  |  | Página:<br>6            |  |  |  |  |
| Preparado Por:<br>Maria Lúcia de Oliveira               |                                 |                                            |               |                                      | Responsável pelo Processo:<br>MARIA LUCIA/SOLANGE/ADRIANA/CARMEM/ALEX |                                     |                                         |                       |       | Identificação do Produto:<br>9.410.0.912.004.4 / 9.610.0.912.007.4 |                     |                     |               |         | Cliente:<br>Technous/Almar                                                        |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |
| Fornecedor:<br>COPAX INDUSTRIAL LTDA                    |                                 |                                            |               |                                      |                                                                       |                                     |                                         |                       |       |                                                                    |                     |                     |               |         | Número/Rev. Peça (Fornecedor):<br>9.410.0.912.004.4 - 11 / 9.610.0.912.007.4 - 16 |       |  |  |  | Data:<br>9/2/2009       |  |  |  |  |
| Equipe:<br>MARIA LUCIA/EDNA/SOLANGE/ADRIANA/CARMEM/ALEX |                                 |                                            |               |                                      |                                                                       |                                     |                                         |                       |       |                                                                    |                     |                     |               |         | Aprovado Por:<br>Gilberto Abu Gamiam                                              |       |  |  |  | Data Rev.:<br>2/2/2009  |  |  |  |  |
| Observações:                                            |                                 |                                            |               |                                      |                                                                       |                                     |                                         |                       |       |                                                                    |                     |                     |               |         | Data Início:<br>2/2/2009                                                          |       |  |  |  | Data Chave:<br>2/2/2009 |  |  |  |  |
| Função & Requisitos do Processo                         | Modo de Falha Potencial         | Efeito Potencial da Falha                  | S e I v a t s | Causa / Mecanismo Potencial da Falha | O c f t                                                               | Controles Atuais do Processo        |                                         | D e t e c t a b i l e | N P R | Ações Recomendadas                                                 | Responsável / Prazo | Resultado das Ações |               |         |                                                                                   |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |
|                                                         |                                 |                                            |               |                                      |                                                                       | PREVENÇÃO                           | DETECÇÃO                                |                       |       |                                                                    |                     | Ações Tomadas       | S e I v a t s | O c f t | D e t e c t a b i l e                                                             | N P R |  |  |  |                         |  |  |  |  |
| 110- MOVER PARA OS TANQUES DE ANODIZAÇÃO                | QUEDA DAS PEÇAS                 | PEÇAS DANIFICADAS                          | 7             | MANUSEIO INADEQUADO                  | 2                                                                     | PQ. 7.07                            | CONTROLE VISUAL                         | 8                     | 112   | NÃO REQUER                                                         |                     |                     |               |         |                                                                                   |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |
| 120- ANODIZAR                                           | FALHA DO OPERADOR               | PEÇA QUEIMADA                              | 7             | FALHA OPERACIONAL                    | 2                                                                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO | CONTROLE VISUAL                         | 8                     | 112   | NÃO REQUER                                                         |                     |                     |               |         |                                                                                   |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |
|                                                         | CAMADA ABAIXO DO ESPECIFICADO   | REFUGO                                     | 7             | FALHA OPERACIONAL                    | 2                                                                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO | CONTROLE VISUAL                         | 8                     | 112   | NÃO REQUER                                                         |                     |                     |               |         |                                                                                   |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |
|                                                         | CAMADA ACIMA DO ESPECIFICADO    | REFUGO                                     | 7             | FALHA OPERACIONAL                    | 2                                                                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO | CONTROLE VISUAL                         | 8                     | 112   | NÃO REQUER                                                         |                     |                     |               |         |                                                                                   |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |
| 120.1- LAVAR                                            | ÁGUA CONTAMINADA                | MANCHADAS / APARENCIA INSATISFATORIA       | 6             | FALHA OPERACIONAL                    | 2                                                                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO | ANÁLISE DO PH                           | 7                     | 84    | NÃO REQUER                                                         |                     |                     |               |         |                                                                                   |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |
| 130- CONTROLAR PROCESSO                                 | LIBERAÇÃO DE PEÇAS NÃO CONFORME | INSATISFAÇÃO DO CLIENTE                    | 8             | FALHA OPERACIONAL                    | 2                                                                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO | ANÁLISE METALOGRAFICA / CONTROLE VISUAL | 6                     | 96    | NÃO REQUER                                                         |                     |                     |               |         |                                                                                   |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |
| 130.1- LAVAR                                            | ÁGUA CONTAMINADA                | PEÇAS MANCHADAS / APARENCIA INSATISFATORIA | 6             | FALHA OPERACIONAL                    | 2                                                                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO | ANÁLISE DO PH                           | 7                     | 84    | NÃO REQUER                                                         |                     |                     |               |         |                                                                                   |       |  |  |  |                         |  |  |  |  |

# Anexo A.2 Detalhe do FMEA de processo da anodização

| COPAX                                                   |                                       |                                            |                                  |                                                  |                       |                                                                       |                 |                           |                                                                                   | FMEA DE PROCESSO    |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------|--|--|--|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Número da Peça (Cliente):<br>9.410.0.912.004.4          |                                       |                                            | Rev./Data Des.:<br>11-01/03/2000 |                                                  |                       | Nome da Peça:<br>TUBO DE SAÍDA D'ÁGUA                                 |                 |                           | Número da FMEA:<br>054-09                                                         |                     |                     | Página:<br>96           |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| Preparado Por:<br>9.610.0.912.007.4                     |                                       |                                            | 16-01/03/2000                    |                                                  |                       | Responsável pelo Processo:<br>MARIA LÚCIA/SOLANGE/ADRIANA/CARMEM/ALEX |                 |                           | Cliente:                                                                          |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| Fornecedor:<br>COPAX INDUSTRIAL LTDA                    |                                       |                                            |                                  |                                                  |                       | Identificação do Produto:<br>9.410.0.912.004.4 / 9.610.0.912.007.4    |                 |                           | Número/Rev. Peça (Fornecedor):<br>9.410.0.912.004.4 - 11 / 9.610.0.912.007.4 - 16 |                     |                     | Técnicos/ Alinar        |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| Equipe:<br>MARIA LÚCIA/EDNA/SOLANGE/ADRIANA/CARMEM/ALEX |                                       |                                            |                                  |                                                  |                       | Aprovado Por:<br>Gilberto Abu Gannam                                  |                 |                           | Data Início:<br>21/2/2009                                                         |                     |                     | Data Rev.:<br>21/2/2009 |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| Observações:                                            |                                       |                                            |                                  |                                                  |                       |                                                                       |                 |                           |                                                                                   |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| Função & Requisitos do Processo                         | Modo de Falha Potencial               | Efeito Potencial da Falha                  | S e i a v e s f                  | C a u s a / M e c a n i s m o Potencial da Falha | O c o r r ê n c i a f | Controles Atuais do Processo                                          |                 | D e t e r m i n a ç ã o R | Ações Recomendadas                                                                | Responsável / Prazo | Resultado das Ações |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
|                                                         |                                       |                                            |                                  |                                                  |                       | PREVENÇÃO                                                             | DETECÇÃO        |                           |                                                                                   |                     | S e i a v e s f     | O c o r r ê n c i a f   | S e i a v e s f | O c o r r ê n c i a f |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| 140- DESMONTAGEM DAS GANÇEIRAS                          | QUEDA DE PEÇAS                        | REFUGO                                     | 7                                | FALHA OPERACIONAL                                | 2                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO                                   | CONTROLE VISUAL | 8                         | NÃO REQUER                                                                        |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
|                                                         | RISCOS E BATIDAS                      |                                            | 7                                | FALHA OPERACIONAL                                | 2                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO                                   | CONTROLE VISUAL | 8                         | NÃO REQUER                                                                        |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| 150- LAVAR                                              | ÁGUA CONTAMINADA                      | PEÇAS MANCHADAS / APARÊNCIA INSATISFATORIA | 6                                | FALHA OPERACIONAL                                | 2                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO                                   | ANÁLISE DO PH   | 7                         | NÃO REQUER                                                                        |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| 160- SELAGEM                                            | TEMPO INSUFICIENTE                    | NÃO FECHA OS POROS                         | 7                                | FALHA OPERACIONAL                                | 2                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO                                   | CRONÔMETRO      | 6                         | NÃO REQUER                                                                        |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| 160-1- LAVAR                                            | ÁGUA CONTAMINADA (EXCESSO DE SELAGEM) | PEÇAS MANCHADAS                            | 6                                | FALHA OPERACIONAL                                | 2                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO                                   | ANÁLISE DO PH   | 7                         | NÃO REQUER                                                                        |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| 170- LAVAR EM ÁGUA QUENTE                               | TEMPERATURA ABAIXO DO ESPECIFICADO    | PEÇAS UNIDAS                               | 6                                | FALHA OPERACIONAL                                | 2                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO                                   | TERMÔMETRO      | 6                         | NÃO REQUER                                                                        |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| 180- MOVER PARA EXPEDIÇÃO                               | QUEDA DAS PEÇAS                       | PEÇAS DANIFICADAS                          | 7                                | MANUSEIO INADEQUADO                              | 2                     | Pq. 7.07                                                              | CONTROLE VISUAL | 8                         | NÃO REQUER                                                                        |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| 190- SECAR PEÇAS                                        | PEÇAS UNIDAS                          | PEÇAS MANCHADAS                            | 6                                | FALHA OPERACIONAL                                | 2                     | INSTRUÇÃO DE TRABALHO / TREINAMENTO                                   | CONTROLE VISUAL | 8                         | NÃO REQUER                                                                        |                     |                     |                         |                 |                       |  |  |  |  |  |                                                                                       |  |